

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

Asesoría técnica en aspectos geosísmicos para conocer la relación de las grietas con los derrames Basálticos en la zona de Santa María Nativitas y el Embarcadero de Zacapa, Alcaldía Xochimilco, CDMX.

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Machado González Omar Rodrigo

ASESOR DE INFORME

M. en C. Javier Francisco Lermo
Samaniego



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021.

Dedicatorias

A mis padres, Socorro González y Norberto Machado Pimentel por todo el apoyo, sacrificio, cariño y responsabilidad para conmigo, por todas esas noches y días de estudio, por todas las charlas, por todas las muestras de amor. No encuentro manera de agradecerle ambos, espero que este trabajo compense de alguna forma todo lo que les debo. Este trabajo es de ustedes.

A José Jacobo Jiménez González. Sin duda fuste, eres y serás una persona muy importante para mí. Gracias por todo el cariño, respeto y admiración que tuviste hacia mí. Siempre fue recíproco hacia ti. Gracias por ser el segundo padre que fuiste conmigo. Me siento afortunado y feliz de que hayas formado parte de mi vida.

A Guadalupe Hernández López. Por esa chispa de alegría en mi vida, esa forma de ver las cosas en otra perspectiva, esa manera pícaro de ser. Eso siempre me ayudó a buscarle el lado positivo a todo. Esa forma de pensar y de ser se ha quedado conmigo.

A Carmen Jacobo González. Gracias por ser el ejemplo que eres con nosotros. Una de las mujeres importantes que tengo en mi vida.

A mis hermanos Norberto, Rafael, Octavio, Oscar, Mireya, Víctor, y sin olvidar a Edith Jiménez y Arturo Guerra. Mis ejemplos, mis mentores. Todo lo que inculcó nuestro querido padre Norberto, estará siempre reflejado en ustedes. Gracias por todo el cariño y apoyo.

A mis primos Maricruz y Alejandro, sin duda alguna toda la forma de ser de su madre está en ustedes. Gracias por su cariño, gracias por todas esas convivencias que desde niños tuvimos. Ese lazo que tenemos va más allá de ser primos. Mis respetos, cariño y admiración para ustedes siempre.

Agradecimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería, por ser formadores de excelentes profesionistas. Siempre correspondido y agradecido con la Máxima Casa de Estudios.

Al Instituto de Ingeniería. Por todo el apoyo académico y económico brindado. Un gran pilar en el desarrollo tecnológico e ingenieril de la UNAM y México.

Al M. en C. Javier Francisco Lermo Samaniego. Por todo apoyo y el interés en cada situación académica y personal que tiene con nosotros, sus trabajadores. Por compartir todo el conocimiento adquirido durante toda su experiencia laboral y académica. Siempre agradecido.

A mis sinodales, Dr. Sánchez Sesma, Dr. Josué Tago, Dr. Ovando Shelley y al M. en C. Escobedo Zenil. Por su dedicación y esmero a la formación de nuevos profesionistas. Gracias por su revisión, corrección y sugerencias para este trabajo. Mi admiración para cada uno de ustedes.

A mis compañeros y amigos del Instituto. Iván Álvarez, Erick Ramos y Juan Luna. Sin su apoyo, no habría tenido estos resultados. Gracias por sus consejos, aportaciones y apoyo en el desarrollo de este trabajo. Gracias por ser un excelente grupo de trabajo. También sin olvidar a Juan Cruz, Omar García y Mario Jiménez. A todos ustedes, gracias por su amistad.

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivo	2
1.2	Objetivos específicos	2
1.3	Zona de estudio	2
2.	ANTECEDENTES.....	4
2.1	Estudios geofísicos.....	4
2.2	Estudios geotécnicos y geológicos.	6
2.3	Interpretación geológica del área de estudio.....	8
2.4	Principales mecanismos de generación de grietas.....	11
3.	MARCO TEÓRICO	14
3.1	Cociente espectral H/V con ruido	14
3.2	Campo difuso	16
3.3	Principio de equipartición	16
3.4	Función de Green y densidades de energía	16
4.	ADQUISICIÓN Y PROCESADO DE DATOS	18
4.1	Medición de microtemores o ruido sísmico ambiental.....	18
4.2	Procesamiento del ruido sísmico para obtener el cociente espectral H/V	20
4.3	Modelos estratigráficos e inversión de las curvas espectrales H/V.....	22
4.4	Familias H/V, perfiles de velocidades de corte (Vs) 1-D y relación con sondeos geotécnicos.....	24
5.	RESULTADOS	33
5.1	Mapa de periodo del suelo.....	33
4.2	Mapa de espesores.	36
5.3	Mapa de velocidades de onda de corte (Vs).....	42
5.4	Comparativo entre los mapas de periodos, espesores y velocidades de corte (Vs).	44
5.5	Perfiles estratigráficos a partir del mapa de espesores (Inversión HV Inv).....	46
6.	CONCLUSIONES.....	52
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	55
	ANEXO A.....	58
	ANEXO B.....	80

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del Valle de México es endorreica y se ubica dentro del eje neo-volcánico, el cual se extiende en dirección este-oeste por la zona centro del territorio mexicano. Está rodeada por altas montañas, limitada al norte por las sierras de Pachuca, Tepetzotlán, Guadalupe, Patlachique y Tepozán. Al sur está limitada por la sierra de Chichinautzin. Al este limita con la sierra Nevada, con sus picos Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Al oeste la cuenca limita con las sierras de monte alto y las cruces. Dentro de la cuenca existen estructuras monogenéticas como el Peñón del Marqués, la Sierra de Santa Catarina y el Cerro de la Estrella (Díaz-Rodríguez, 2006).

Las sierras que rodean la CVM y la limitan son las siguientes. Al norte el límite lo establecen las sierras de Pachuca, Tepetzotlán, Guadalupe, Patlachique y Tepozán (todas estas sierras, a excepción de la sierra de Guadalupe, se ubican fuera de la zona de estudio), también denominado campo volcánico Apan-Tezontepec. Al sur, la sierra de Chichinautzin establece el límite. La sierra Nevada, que incluye a los volcanes Iztaccíhuatl, Popocatepetl, Telapón y Tláloc, es el límite este de la cuenca (esta sierra tampoco se encuentra dentro de la zona de estudio). Por último, al oeste la cuenca limita con las sierras de Monte Bajo, Monte Alto y Las Cruces (Díaz-Rodríguez, 2006; Arce et al., 2019).

La cuenca del valle de México estuvo formada por cinco lagos someros: Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco. A principios del siglo XIX se tomó la decisión de secar los grandes cuerpos de agua del valle de México con el objetivo de evitar las inundaciones y proveer de sitios para el asentamiento de la creciente población. A principios del siglo XX se incrementó la perforación de pozos para la extracción de agua y satisfacer la demanda de la población. Esto, aunado a la poca recarga de los mantos acuíferos, ha dado lugar al fenómeno de subsidencia que se refiere a los hundimientos graduales o súbitos de la superficie. Tales hundimientos han propiciado la generación de grietas en el valle, principalmente en las alcaldías de Iztapalapa, Tláhuac y Xochimilco (Martínez-González, 2011).

La zona de estudio, ha sufrido recientemente de problemas como la aparición de grietas y socavones. En 2016, el sistema de aguas de la Ciudad de México realizó un estudio geofísico sobre la avenida nueva Xochimilco-Tulyehualco con el objetivo de determinar la traza de grietas que generó asentamientos y oquedades debajo de la avenida. Se realizaron 3 líneas geofísicas de resistividad con el dispositivo dipolo-dipolo de alta densidad (tomografía eléctrica) con penetración de hasta 30 m. Como resultado del estudio geofísico, se considera que la zona está afectada por una falla activa que ha roto el cuerpo de rocas basálticas y los materiales subyacentes. Las rocas basálticas conducen las aguas pluviales, generando el flujo de materiales finos por el plano de falla. La orientación de la falla es casi este-oeste, siendo el bloque localizado al norte el que desciende (SACMEX, 2016).

Posteriormente, en la zona del embarcadero de Zacapa, el 24 de enero de 2017 se produjo otro socavón a escasos 30 m del restaurante Los Manantiales, lo que provocó que el nivel del agua disminuyera. Para investigar este problema, se realizó otro estudio de tomografía de resistividad

eléctrica en dos dimensiones para la caracterización del subsuelo. Este estudio concluyó que en la zona existen fallas activas que han ocasionado daños estructurales a las casas habitación, además de cavidades que pasan por debajo del canal y que ocasionaron la formación del socavón (Chávez-Segura *et. al.*, 2017).

Después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (Mw7.1), la zona de Xochimilco que limita con la sierra de Chichinautzin fue seriamente afectada por derrumbes, daños a estructuras y la aparición de un mayor de grietas en colonias como Santa María Nativitas y San Gregorio Atlapulco. En la carretera Vieja Xochimilco-Tulyehualco, se reportó la aparición de grietas que causaron daños considerables, por lo que la carretera tuvo que cerrarse para su reparación. Por tal razón en este sitio se realizaron sondeos geotécnicos, a una profundidad de hasta 50 m, para evaluar las causas de los agrietamientos.

1.1 Objetivo

Este estudio tiene como objetivo, establecer el origen de las grietas que posiblemente influyeron en el daño estructural en el sismo del 19 de septiembre de 2017. Para esto, se realizaron mediciones de ruido sísmico en varios lugares que faltaban. Esto se hizo para definir la configuración geomorfológica de los derrames basálticos y su posible relación con la distribución de las grietas distribuidas en la zona de Santa María Nativitas y el embarcadero de Zacapa.

1.2 Objetivos específicos

1. Obtener, mediante la técnica del cociente espectral H/V, los periodos de vibración del suelo en la zona de estudio.
2. Obtener perfiles 1-D de velocidad de onda de corte (V_s) en los puntos donde se realizó la medición de ruido sísmico ambiental.
3. Realizar mapa de periodos, espesores equivalentes y velocidades promedio de onda de corte (V_s), obtenidos a partir de la medición de ruido sísmico ambiental
4. Realizar perfiles estratigráficos en base a la información de los mapas de espesores y compararlos con la información recabada.

1.3 Zona de estudio

La zona de estudio se localiza al sur de la cuenca del Valle de México, justo en el límite entre la sierra de Chichinautzin y la zona del antiguo lago de Xochimilco, en la colonia Santa María Nativitas, alcaldía de Xochimilco. (Figura 1)

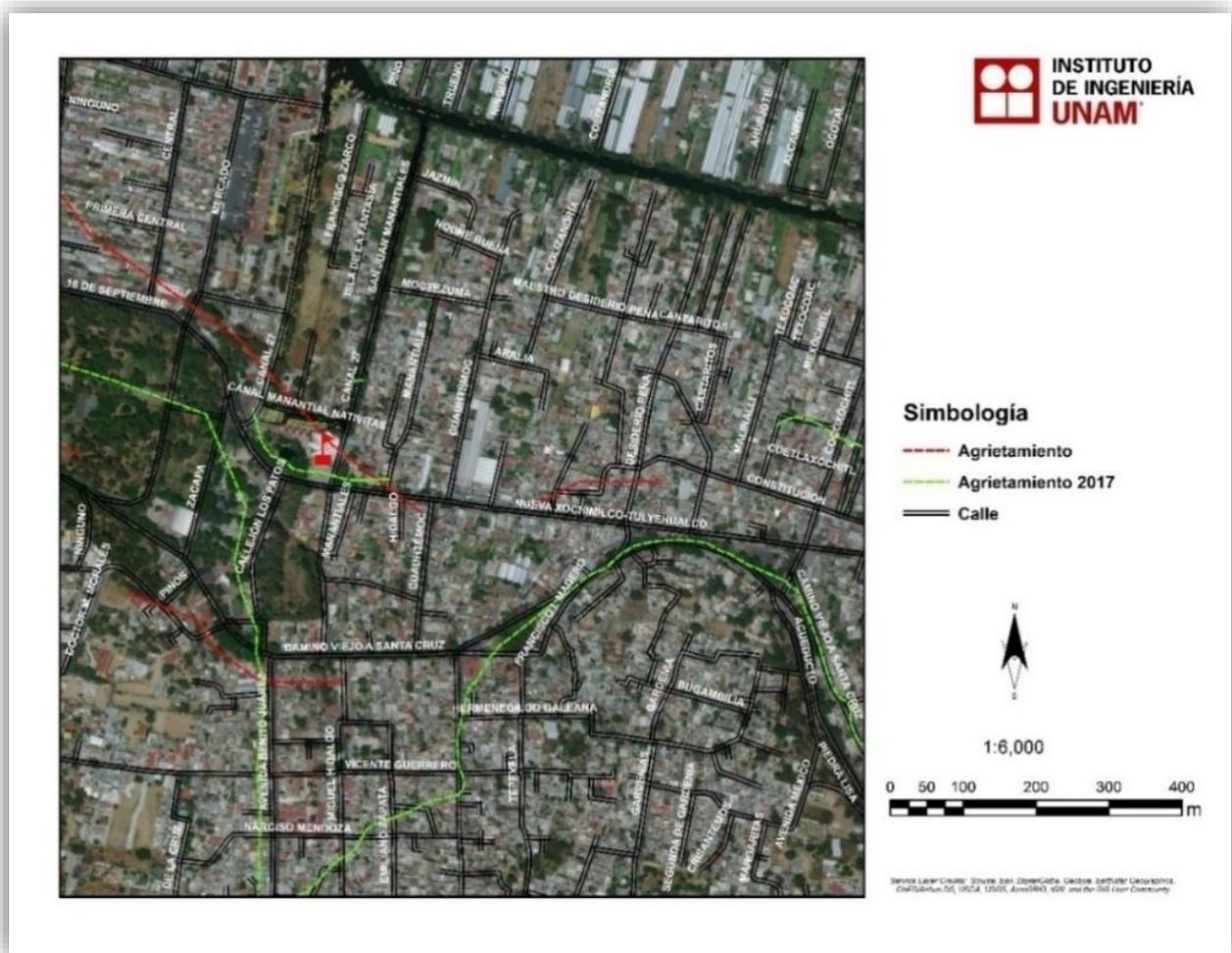


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio, de la alcaldía de Xochimilco, CDMX.

2. ANTECEDENTES

2.1 Estudios geofísicos

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) realizó un estudio geofísico sobre la avenida nueva Xochimilco-Tulyehualco con el objetivo de determinar la traza de una falla de asentamiento que generó oquedades debajo de la avenida. Se realizaron 3 líneas geofísicas de resistividad con el dispositivo dipolo-dipolo de alta densidad (tomografía eléctrica) con penetración de hasta 30 m (SACMEX, 2016).

Como resultado del estudio geofísico, se considera que la zona está afectada por una falla activa que ha roto el cuerpo de rocas basálticas y los materiales subyacentes. Las rocas basálticas conducen las aguas pluviales, generando el flujo de materiales finos por el plano de falla. La orientación de la falla es casi este-oeste, siendo el bloque localizado al norte el que desciende (SACMEX, 2016). El estudio se aprecia en la Figura 2.



Figura 2. Imagen tomada del estudio SACMEX 2016, donde las líneas color naranja indican la trayectoria de la falla.

Posteriormente (Machado et al., 2019), realizaron un estudio de peligro sísmico para encontrar el origen de los agrietamientos en la zona de la carretera Xochimilco-Tulyehualco, y estimar el comportamiento dinámico de esos suelos. En la Figura 3 (izquierda) se observa el mapa de periodos de vibración del suelo determinado mediante la evaluación de los cocientes H/V. La parte sur de la zona de estudio presenta periodos menores a 0.5 s, por lo que se considera como zona de Lomas. Del límite que marca la carretera hacia el norte hay un cambio abrupto en los valores de periodo, pasando de zona de Lomas (0-0.5 s) a zona de Lago (>1.0 s) con una zona de transición (0.5-1.0 s) casi inexistente. Al oeste, el periodo cambia de 0.5 s a 4.0 s en una distancia menor a los 50 m y que al centro, en un tramo de 100 m aproximadamente, el periodo varía de forma más suave justo en donde no se presenta agrietamiento. Por lo tanto, el agrietamiento se presenta justo en la zona de cambio abrupto de periodo de vibración del suelo. Hacia el norte los periodos son mayores a 1.0 s, por lo que se considera como zona de lago.

En la Figura 3 (derecha) también se observa el mapa de espesores determinado mediante las inversiones de las curvas HV, para realizarlo se tomó como parámetro el contraste de impedancias entre capas que depende si es zona de loma, transición o lago. Para la parte Sur (zona de loma) se diferenció entre el contraste de la capa de piedemonte y la brecha basáltica proveniente de la Sierra del Chichinautzin. El espesor de la capa conformada entre el piedemonte y la brecha va de 1 a 13 m de profundidad. La zona intermedia ubicada en la zona de transición, se definió por el contraste entre la capa de arcilla y la brecha basáltica, los espesores calculados van de los 20 a los 35 m de. Entre estas 2 zonas se presenta el agrietamiento relacionado a la transición abrupta. La zona de lago ubicada al norte del mapa, está definida por el contraste entre la capa de arcilla y los depósitos profundos, van de los 36 a 55 m de espesor.

Este trabajo concluyó que la zona de grietas se ubica en una transición abrupta entre los derrames basáltico de la sierra de Chichinautzin y los depósitos de arcillas del lago de Xochimilco. Por lo que, los resultados de los estudios de tomografía de resistividad eléctrica en dos dimensiones realizados en esta zona para la caracterización del subsuelo, fue mal interpretada y que el agrietamiento **no se debe a una falla geológica** activa como se menciona en el estudio de SACMEX (2016). Este estudio contó con 55 mediciones de ruido sísmico ambiental, donde se clasificaron 3 familias principales. Se usó el software HV Inv® (García-Jeréz, et al 2016) para la inversión de las curvas H/V y obtener los valores de espesores y perfiles 1-D de velocidades de onda de corte (V_s).

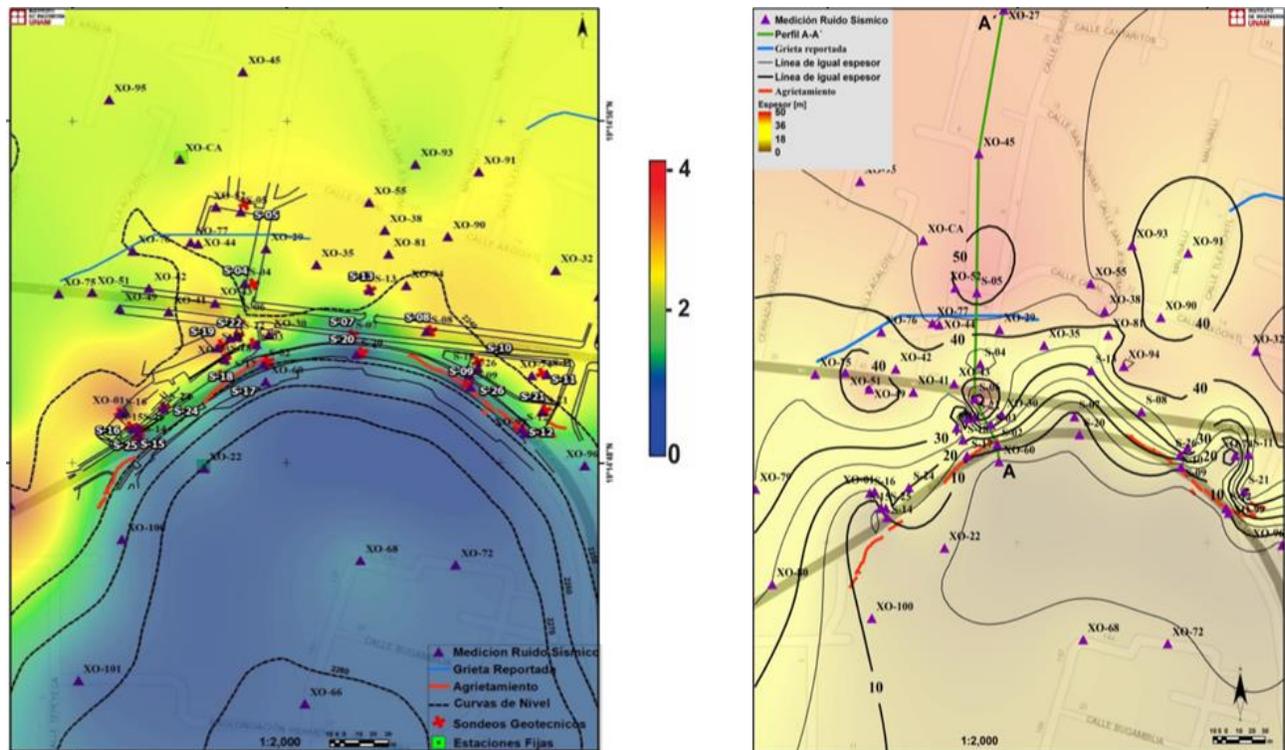


Figura 3. Parte izquierda, mapa de isoperiodos. Parte derecha, mapa de espesores al estrto resistente en metros. (Machado et al., 2019).

2.2 Estudios geotécnicos y geológicos.

Para la rehabilitación de la carretera vieja se conformó un grupo de trabajo encabezado por el M. en C. Javier Francisco Lermo Samaniego en colaboración con el Dr. Juan Manuel Mayoral Villa, el cual formó parte del área de geotecnia. Para este trabajo fui parte en las 3 etapas del proyecto de rehabilitación (adquisición, procesado, análisis de resultados y conclusiones). Para la parte de geotecnia se realizaron 26 sondeos geotécnicos con el objetivo de determinar las características del suelo y determinar la estratigrafía del lugar. Con la interpretación de los sondeos geotécnicos se realizaron perfiles que brindan información de la distribución espacial de las diferentes unidades estratigráficas identificadas en el lugar (Figura 4 y Figura 5).

De los sondeos geotécnicos se identificaron 8 unidades estratigráficas:

- Unidad I: carpeta asfáltica y sección de pavimento formada por arena poco limosa con gravas y gravas con arena.
- Unidad II: relleno formado por limo arenoso color café claro y café oscuro, húmedo, de consistencia firme, con gravas, gravillas y algunos boleos de basalto.
- Unidad III: piedemonte formado por gravas, gravillas, y fragmentos de roca basáltica, de forma angulosa, con arena arcillosa y arcilla color gris verdoso y gris oscuro.
- Unidad IV: brecha basáltica formada por gravas y fragmentos de roca, color gris oscuro, en estado suelto, de forma angulosa, con algunos lentes de gravas con arena.
- Unidad V: roca basáltica color gris oscuro, de textura afanítica, vesicular en su parte superior, fracturada a muy fracturada, en algunos intervalos se presenta muy alterada.
- Unidad VI: limo color negro, de baja plasticidad y consistencia firme, con algunas gravillas, presenta lentes de arena.
- Unidad VII: arena volcánica de grano fino color gris oscuro y negro, de compacidad alta a muy alta, con algunas gravillas.
- Unidad VIII: arcilla lacustre color gris verdoso y café rojizo, de alta plasticidad y consistencia muy blanda, con lentes de arena, ceniza volcánica y limo.

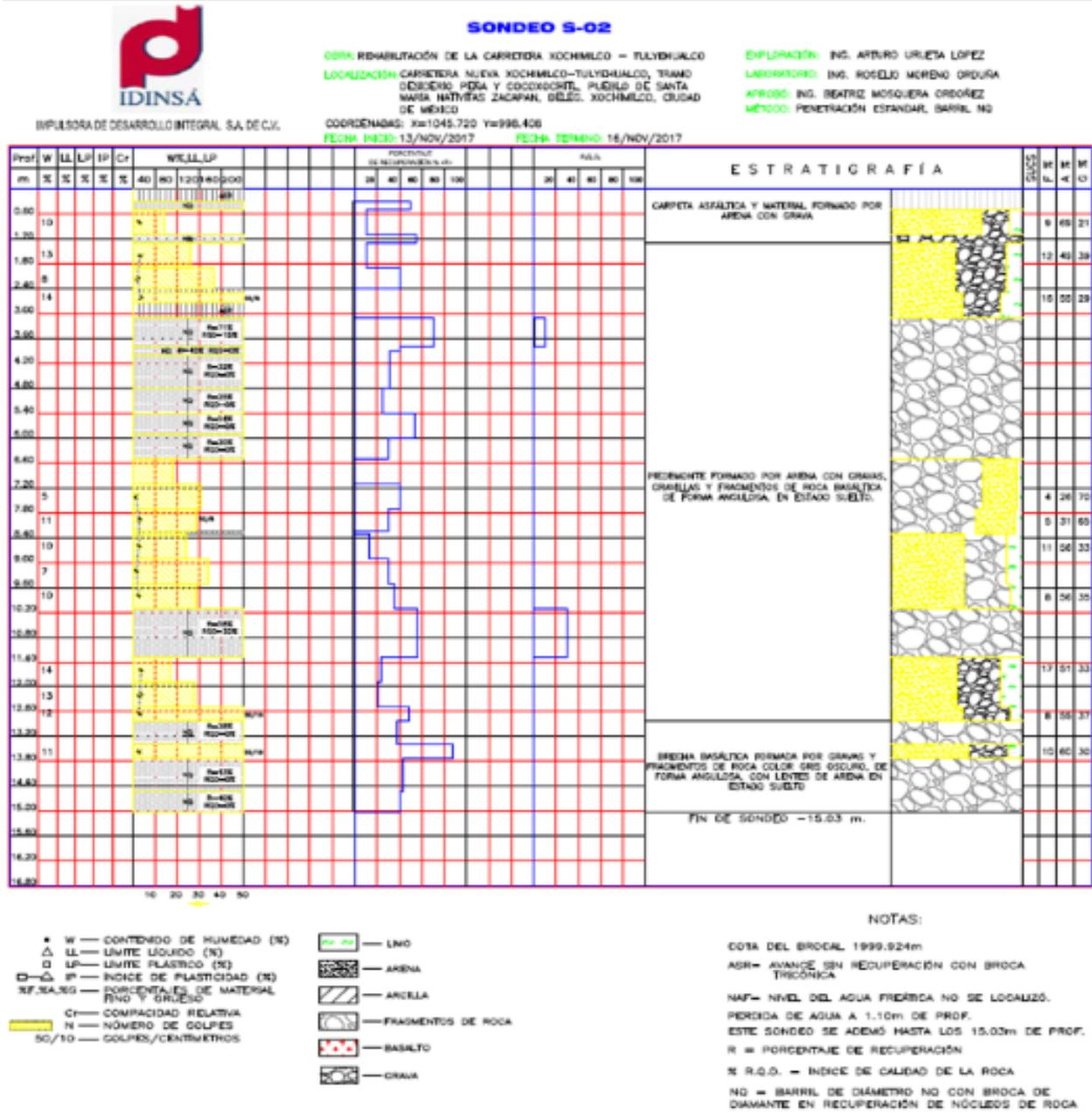


Figura 4. Ejemplo de sondeo geotécnico realizado en la zona de estudio. Sondeo S-02. (Lermo et al., 2019).

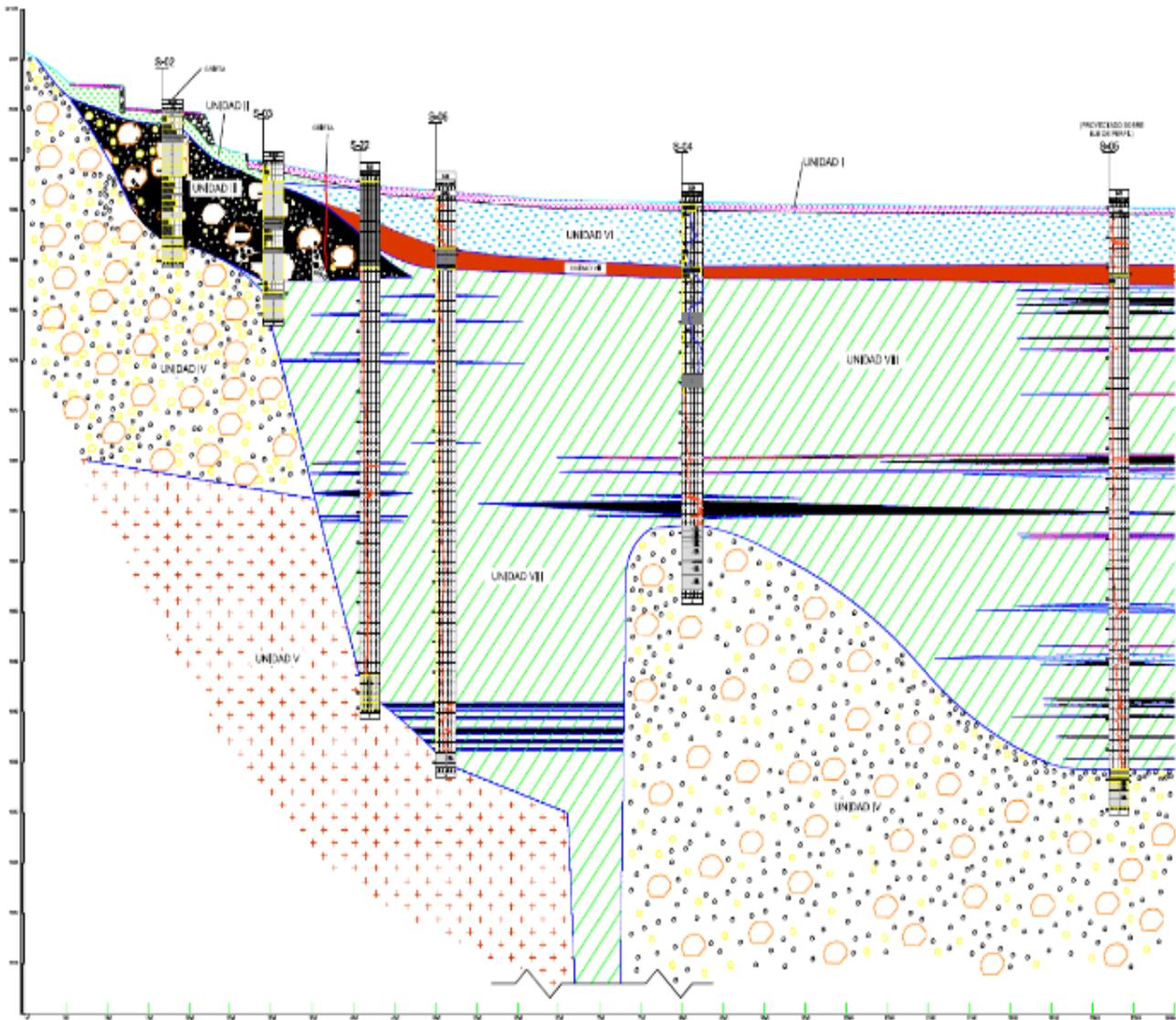


Figura 5. Ejemplo del Perfil geotécnico elaborado con la información de los sondeos S-02, S-03, S-22, S-06, S-04 y S-05. (Lermo et al., 2019).

2.3 Interpretación geológica del área de estudio.

Con la información de los pozos de agua SL20, 279, 278 y S6 perforados por CONAGUA a profundidades mayores a los 150 m, Lermo et al., 2019 elaboraron una sección geológica que parte del volcán Teoca, ubicado en la Sierra de Chichinautzin, a la zona del antiguo lago de Xochimilco y que cruza la zona del presente estudio (Figura 6). El perfil brinda información importante sobre la compleja relación entre los derrames basálticos de la sierra de Chichinautzin y los depósitos de arcilla de la zona de lago. De acuerdo al perfil geológico, existen dos transiciones abruptas justo debajo de la zona de estudio entre los depósitos lacustres y los basaltos: el primero, localizado a 50 m aproximadamente y, el segundo, a una profundidad de 200 m aproximadamente.

También *Lermo et al., 2019* realizaron una interpretación geológica de 6 perfiles geotécnicos con base en la descripción de la estratigrafía de las 8 unidades descritas en los sondeos y la información geológica disponible de la zona de estudio. En la Figura 7 se aprecia como ejemplo la reinterpretación geológica del perfil geotécnico 1-1 mostrado en la Figura 5. Cabe señalar que la interpretación geotécnica anterior señalaba la presencia de una falla en el sitio. La interpretación geológica de los perfiles geotécnicos no atribuye a una falla los cambios abruptos de las unidades IV y V, sino a la variación espacial de los distintos derrames basálticos provenientes de la sierra de Chichinautzin.

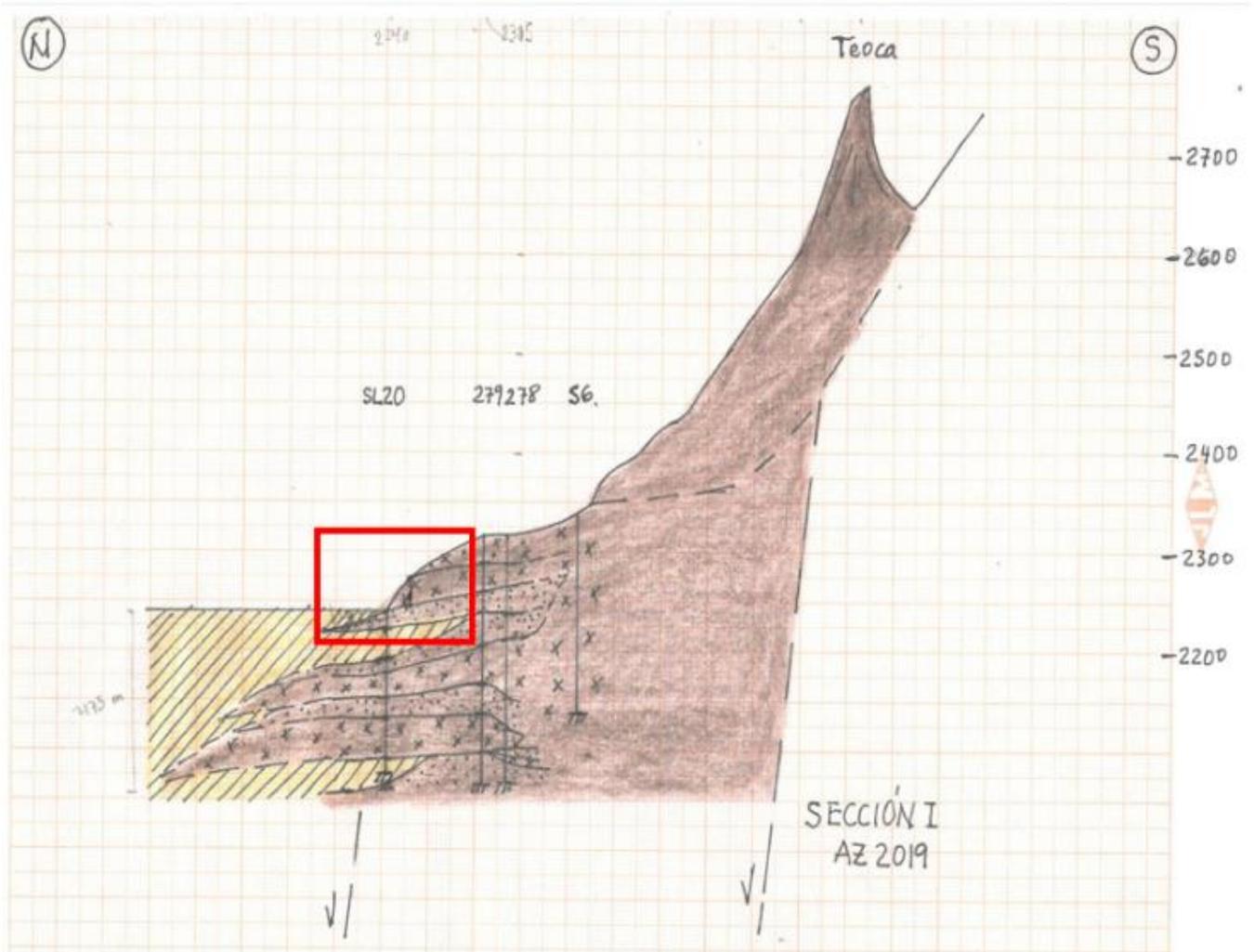


Figura 6. Perfil geológico en dirección S-N, que parte del volcán Teoca, en la sierra de Chichinautzin, a la zona del antiguo lago de Xochimilco. El cuadro en rojo marca la zona de estudio. En color amarillo y achurado en líneas diagonales se representan los depósitos de arcilla; en color café con cruces se representan los derrames basálticos; y, por último, en color café con puntos se representan depósitos de tobas (*Lermo et al., 2019*).

REHABILITACIÓN DE LA CARRETERA XOCHIMILCO-TULYEHUALCO

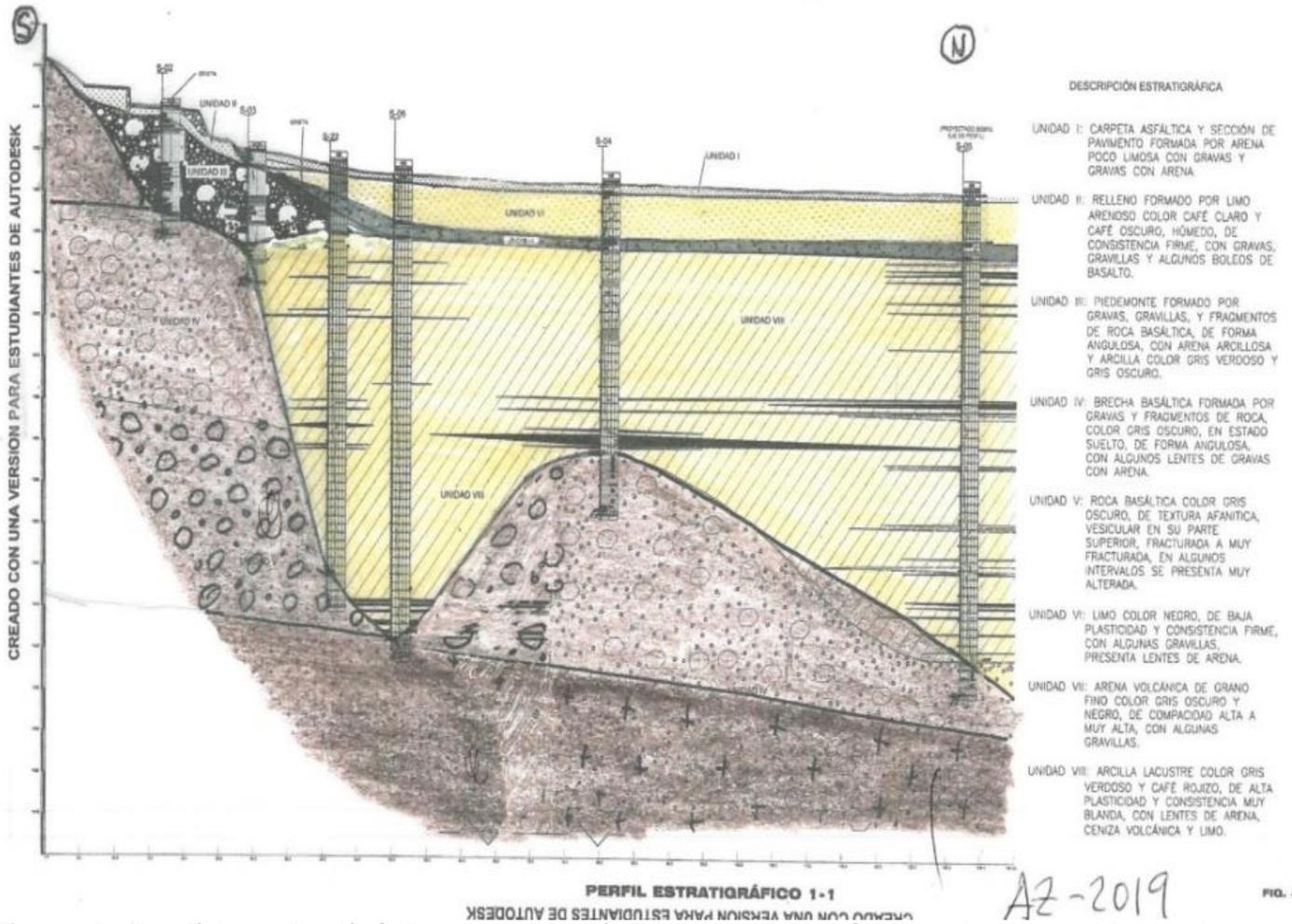


Figura 7. Perfil geológico en dirección S-N, que parte del volcán Teoca, en la sierra de Chichinautzin, a la zona del antiguo lago de Xochimilco. El cuadro en rojo marca la zona de estudio. En color amarillo y achurado en líneas diagonales se representan los depósitos de arcilla; en color café con cruces se representan los derrames basálticos; y, por último, en color café con puntos se representan depósitos de tobas (Lermo et al., 2019).

2.4 Principales mecanismos de generación de grietas

El fracturamiento de los depósitos arcillosos que rellenan las cuencas lacustres sobre las que se han desarrollado zonas urbanas se han convertido en un problema que afecta a varias ciudades del centro de México. Los estudios realizados revelan la coexistencia de varios factores que determinan las características de diversos tipos de fracturamiento a diferentes escalas.

El agrietamiento del suelo tiene distintas causas, incluyendo: la contracción de las arcillas lacustres por secado, la existencia de esfuerzos de tensión asociados al peso de las construcciones, al fracturamiento hidráulico en zonas de encharcamientos y los movimientos sísmicos (Auvinet et al., 2016). Los principales mecanismos de fracturamiento del suelo son:

- *Tipo I. Agrietamiento por fracturamiento hidráulico en zonas de encharcamientos (Figura 8).* Al iniciarse la época de lluvias, se generan encharcamientos de agua en áreas considerables que producen presiones internas en la punta de grietas por secado preexistentes, lo que facilita su propagación. Este tipo de grietas se presentan con intensidad en las planicies secas del lago de Texcoco y del lago de Chalco (Auvinet et al., 2016).
- *Tipo II. Agrietamiento asociado a la consolidación regional en zonas de transición abrupta (Figura 9).* Este mecanismo de agrietamiento es el responsable de generar y propagar a las grietas más importantes y destructivas. Es una consecuencia directa de la consolidación regional que se presenta en el valle de México por efecto del bombeo de agua en estratos profundos. Se manifiestan cuando los depósitos de suelo blandos son sometidos al proceso de consolidación regional también llamado subsidencia. Se presentan en las zonas de transición abrupta entre los contactos de suelos firmes con suelos blandos y se caracterizan por presentar un escalón hacia la zona de mayor asentamiento (Auvinet et al., 2016).
- *Tipo III. Agrietamiento atribuible a anomalías estratigráficas.* Este mecanismo se origina por una irregularidad estratigráfica (Auvinet et al., 2016).
- *Tipo IV. Grietas atribuibles a evapo-transpiración.* Algunas grietas que han aparecido en zonas donde el nivel freático se encuentra abatido, se atribuyen al incipiente secado de las arcillas facilitado por la presencia de árboles (Auvinet et al., 2016).
- *Tipo V. Grietas atribuibles a estructuras geológicas sepultadas (Figura 10).* Al existir estructuras geológicas sepultadas en las arcillas lacustres, la consolidación regional puede inducir agrietamientos en la superficie (Auvinet et al., 2016).

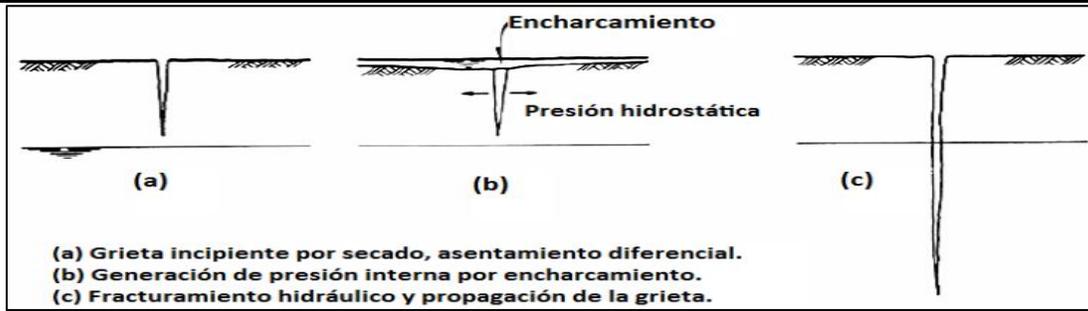


Figura 8. Grietas del Tipo I generadas por fracturamiento hidráulico. Tomada de Martínez-González (2011).

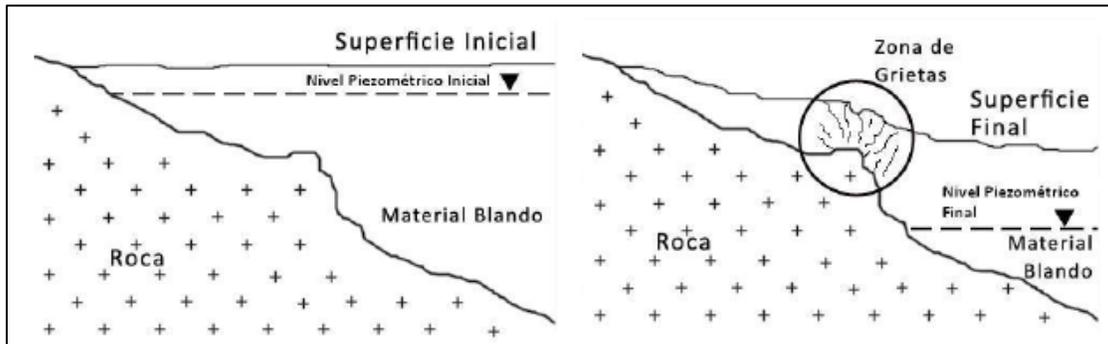


Figura 9. Grietas del tipo II generadas por consolidación regional y transición abrupta. Tomada de Martínez-González (2011).

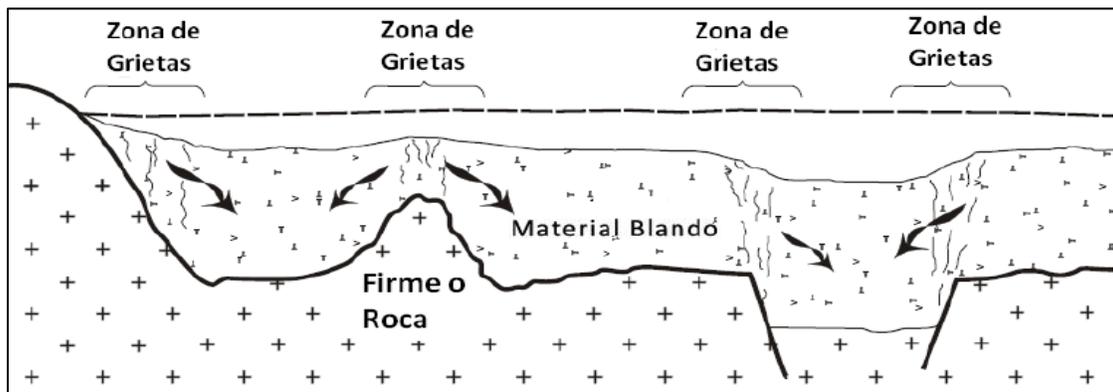


Figura 10. Grietas del Tipo V generadas por estructuras geológicas sepultadas. Tomada de Martínez-González (2011).

Las Grietas Tipo II pertenecen a las grietas más importantes y destructivas y se presenta en las zonas de transición abrupta entre materiales de suelos firmes a suelos blandos y se caracterizan por presentar un escalón hacia la zona de mayor asentamiento y generalmente son paralelas a las curvas de nivel que se ubican al pie de las laderas de las sierras o cerros (Auvinet et al., 2014). Las grietas Tipo II se manifiestan cuando los depósitos de suelos blandos son sometidos al proceso de consolidación general también llamado hundimiento regional y éstos rodean y se ubican al pie de las laderas de las sierras, cerros, afloramiento de rocas o cuerpos de materiales rígidos (ver Figura 11). A diferencia de las grietas por fracturación hidráulica, suelen presentar un escalón que resulta muy destructivo para las construcciones (Auvinet et al., 2016).

El fenómeno de agrietamiento asociado al hundimiento regional en zonas de transición abrupta toma una importancia particular al pie de las laderas que circundan la Sierra de Santa Catarina y la Sierra Peñón Viejo-Cerro del Márquez, al pie de la ladera oriente del Cerro Guerrero, al pie de las laderas que circundan al Cerro del Peñón de los Baños; al pie de la ladera sur del Cerro de Chimalhuacán; al pie de las laderas de los Cerros del Volcán Xico y al pie de la ladera norte de la Sierra del Chichinautzin (Auvinet et al., 2014).

Las grietas provocadas por el hundimiento diferencial en zonas de transición abrupta son muy difíciles de controlar. Teóricamente, bastaría con suspender el bombeo en pozos profundos para detener el hundimiento regional y la consolidación de los suelos blandos (Auvinet, 2014).

Debe reconocerse que las grietas se vuelven más peligrosas conforme se erosionan y ensanchan. Y aún después de su tratamiento, las grietas siguen evolucionando mientras persiste el mecanismo que las originó, por lo tanto, es necesario que exista un seguimiento continuo que permita evaluar su evolución geométrica. Por otro lado, es importante tomar en cuenta la presencia real o potencial de grietas en el diseño de construcciones e instalaciones para evitar o por lo menos disminuir el daño que puedan ocasionar a las estructuras (Auvinet et al., 2014). Como se puede observar en la Figura 12, Auvinet predice los agrietamientos que se desarrollaron alrededor de la sierra del Chichinautzin después del terremoto del 19 de septiembre del 2017 (Mw7.1).



Figura 11. Grieta distintiva con escalón asociado al hundimiento en zona de transición abrupta (Auvinet, 2014)

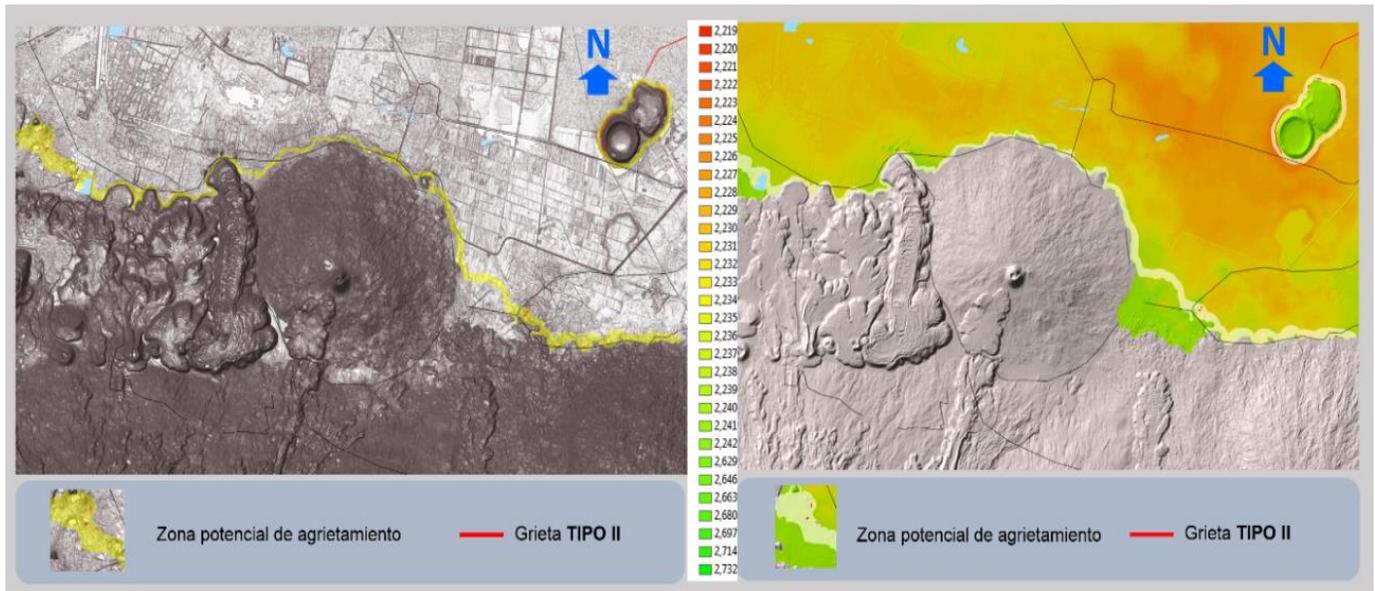


Figura 12. Grietas Tipo II al pie de la ladera norte de la Sierra del Chichinautzin (Auvinet, 2014)

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Cociente espectral H/V con ruido

El cociente espectral H/V también llamado Nakamura o HVSR, fue introducido por Nogoshi e Igarashi (1971) con base en los estudios iniciales de Kanai y Tanaka (1961). Este cociente es muy atractivo para la caracterización de la respuesta de sitio, tanto por su sencillez de operación y su bajo costo como por la rapidez con que permite obtener resultados (SESAME, 2004).

En el trabajo de Lermo y Chávez-García (1993 y 1994), en el cual compararon el cociente espectral estándar que utiliza registros de sismos (SSR, por las siglas en inglés de Standard Spectral Ratio) con el cociente espectral utilizando registros de microtremores, se concluyó que el cociente espectral utilizando microtremores determina de forma precisa el periodo dominante (T_0) de sedimentos sujetos a amplificación dinámica en un intervalo de frecuencias entre 0.3 y 10 Hz, además de estimar de forma preliminar la amplificación.

El procedimiento propuesto por Nakamura (1989) y, Lermo y Chavez-García (1993), se basa en la hipótesis de que la energía de los microtremores o ruido sísmico ambiental consiste principalmente de ondas de Rayleigh y que la amplificación del efecto de sitio se debe a la presencia en la superficie de una capa de suelo blando sobre un semiespacio.

En estas condiciones se tienen cuatro componentes del movimiento del suelo: las componentes horizontales del semiespacio y de la superficie, y la componente vertical del semiespacio y de la superficie. De acuerdo con Nakamura, es posible estimar el efecto de la fuente en la amplitud A_S , por medio del siguiente cociente.

$$A_S = \frac{V_S}{V_B} \quad (3.1)$$

Donde V_S es el espectro de Fourier de la componente vertical del movimiento en la superficie y V_B es el espectro de Fourier de la componente vertical del movimiento en el semiespacio. Entonces, se define como estimación del efecto de sitio, S_E , el siguiente cociente espectral.

$$S_E = \frac{H_S}{H_B} \quad (3.2)$$

Donde H_S es el espectro de Fourier de la componente horizontal del movimiento en la superficie y H_B el espectro de Fourier de la componente horizontal del movimiento en el semiespacio. Para compensar S_E por el efecto de la fuente se calcula la función del efecto de sitio modificada S_M .

$$S_M = \frac{S_E}{A_S} = \frac{\frac{H_S}{H_B}}{\frac{V_S}{V_B}} \quad (3.3)$$

Si se acepta que el cociente H_B/V_B es igual a la unidad, la función del efecto de sitio, corregida por la fuente, se puede escribir mediante la siguiente ecuación.

$$S_M = \frac{H_S}{V_S} \quad (3.4)$$

La suposición H_B/V_B es igual a la unidad fue verificada experimentalmente por Nakamura usando mediciones de microtemores a profundidad en un pozo.

El cociente espectral H/V proporciona información relevante del suelo tales como el periodo de vibración y aproximar la amplificación relativa. Si bien muchos, incluido Nakamura, consideran a este cociente como una función de transferencia empírica, eso no es correcto. H/V no es una función de transferencia que refleja parcialmente la amplificación y describe pobremente la amplificación debida a modos superiores. El tema se ha debatido ampliamente en la literatura y parece resolverse con la propuesta de Kawase et al. (2018).

3.2 Campo difuso

El concepto de campo difuso ha sido de gran utilidad en la arquitectura acústica, recientemente ha sido aplicado en las ondas elásticas en sólidos. La suposición de un campo difuso proporciona una descripción estadística de la respuesta acústica de cuerpos finitos. (Weaver 1982, 1985).

Un ejemplo del concepto se puede considerar a la luz visible, la cual sufre dispersión múltiple cuando atraviesa un cuerpo translúcido y en consecuencia casi no genere sombra, por lo tanto, cuando la luz llega de varias fuentes con ubicaciones aleatorias la iluminación es difusa. Este concepto se ha extendido a los sólidos. En la litosfera terrestre se encuentran múltiples heterogeneidades, esto provoca que los desplazamientos inducidos ya sea por sismos o fuentes antropogénicas estén acompañados por ondas reflejadas, refractadas y difractadas en múltiples direcciones (Piña-Flores, 2015).

3.3 Principio de equipartición

La equipartición de energía se describe para la propagación de ondas elásticas en términos de velocidades de propagación de ondas. La equipartición implica que la energía disponible, es distribuida en proporciones fijas entre los posibles estados. Esto implica que cada tipo de onda tiene una parte de la densidad de energía disponible. Esto que conceptualmente es sencillo requiere de una construcción matemática importante; Weaver (1982) logró mediante un procedimiento estadístico basado en contar modos asociados a las ondas P y a las ondas S, con sus dos polarizaciones, demostrar que en un medio elástico infinito: $\frac{E_s}{E_p} = 2\alpha^3/\beta^3$, donde E_p se refiere a la densidad de energía de la onda P, E_s se refiere a la densidad de energía de onda S; α y β son las velocidades de propagación de onda longitudinales y transversales, respectivamente (Pertou, 2009).

La equipartición es una condición necesaria para poder recuperar la función de Green. La definición de un campo difuso se basa en la equipartición de la energía, la cual se describe usualmente en términos de la polarización y dirección de ondas (Pertou, 2009).

El concepto es sin duda importante y es una piedra angular de la física estadística (Weaver, 2010) y está ligado a la descripción de la función de Green (Pertou y Sánchez-Sesma, 2016) pero a pesar de ser apasionante, nos aleja de la exposición práctica que nos ocupa por lo que solamente se ha mencionado aquí de manera somera.

3.4 Función de Green y densidades de energía

Usando correlaciones cruzadas de ruido ambiental registrado en dos diferentes receptores, se puede recuperar coeficientes de reflexión y transmisión de la estructura inferior con la correlación del campo. Las funciones de Green entre dos sitios en un medio es recuperada con el promedio de las correlaciones cruzadas de sus respectivos registros (Salinas *et al* 2014).

La reconstrucción de la función de Green se basa en promediar las correlaciones de las señales generadas por un gran número de fuentes, independiente entre sí y distribuidas de manera

homogénea. Otra descripción es que la reconstrucción se realiza a partir de señales representativas de un campo difuso, donde aparece la difracción múltiple, bajo esta hipótesis se supone que el campo de ondas resultante es equiparticionado, condición necesaria para recuperar la Función de Green (Piña-Flores, 2015).

Derode et al. (2003) y Larose et al. (2004) mostraron que la difracción múltiple es una mejora a la reconstrucción de la función de Green, esto con un número limitado de fuentes y registros de duración finita. Con esto, el promedio de las correlaciones de los desplazamientos en un receptor, en el dominio de las frecuencias, mide la densidad media de la energía y esta es proporcional a la parte imaginaria de la función de Green cuando la fuente y el receptor coinciden. Así que, se demuestra la proporcionalidad entre las densidades de energía promedio y la parte imaginaria de la función de Green en la fuente, en un punto x_a sobre la dirección m se puede expresar como (Sánchez-Sesma et al., 2008; Pertou et al., 2009):

$$\langle u_m(x_A, \omega)u_m^*(x_A, \omega) \rangle = -2\pi\mu E_s k^{-1} \text{Im}(G_{mm}(x_A, x_A, \omega)) \quad (3.5)$$

En donde la función de Green ($G_{mm}(x_A, x_A, \omega)$) es el desplazamiento de x_A en dirección m producido por una fuerza unitaria armónica que actúa en la misma dirección m y el mismo punto x_A ; $\langle u_m(x_A, \omega)u_m^*(x_A, \omega) \rangle$ es la auto correlación promedio del desplazamiento en dirección m ; ω es la frecuencia angular; k es el número de onda cortante, β es la velocidad de propagación de la onda cortante; E_s se refiere a la densidad de energía promedio de las ondas cortantes; ρ es la densidad de la masa y $\rho\beta^2 = \mu$

El ruido sísmico ambiental es el resultado de la dispersión de ondas sísmicas producidas por varias fuentes, conforme a lo anterior, Sánchez-Sesma, Rodríguez, et al. (2001) se inspiraron en la propuesta de Arai y Tokimatsu (2004) y consideraron el cociente HVSR como:

$$(H/V)(\omega) = \sqrt{\frac{E_1(x, \omega) + E_2(x, \omega)}{E_3(x, \omega)}} \quad (3.6)$$

Donde E_1 , E_2 y E_3 son las densidades de energía para las tres direcciones, los subíndices 1 y 2 se refieren a los componentes horizontales y el 3 al vertical. Además, supusieron que el ruido sísmico es difuso. Así, de las ecuaciones (3.5) y (3.6) se puede expresar el HVSR como (Salinas et al, 2014):

$$(H/V)(\omega) = \sqrt{\frac{\text{Im}(G_{11}(x, x; , \omega)) + \text{Im}(G_{22}(x, x; , \omega))}{\text{Im}(G_{33}(x, x; , \omega))}} \quad (3.7)$$

Kawase en 2011 observó que las componentes verticales y horizontales se describen en la ecuación (3.7) usando la parte imaginaria de la función de Green para fuentes distribuidas que

propagan una onda plana con incidencia vertical. Con esto es posible ajustar el mejor modelo de velocidades de la capa de roca a la superficie para cada interacción resolviendo el problema inverso (Piña-Flores et al., 2017).

4. ADQUISICIÓN Y PROCESADO DE DATOS

4.1 Medición de microtemores o ruido sísmico ambiental

El cociente espectral H/V es una técnica para evaluar algunas características de los depósitos sedimentarios. Debido al bajo costo de las mediciones en campo y del análisis, la técnica H/V ha sido frecuentemente adoptada en la microzonificación sísmica (SESAME, 2004). Para realizar las mediciones de ruido sísmico ambiental o microtemores, el proyecto de investigación europeo SESAME (SiteEffectSassessmentusingAMbientExcitations, por sus siglas en inglés) ha publicado una serie de recomendaciones prácticas, basadas en una investigación detallada, para realizar las mediciones en campo (SESAME, 2004), las cuales se han seguido en el presente proyecto. Las más importantes son las siguientes:

- 1) Para observar una frecuencia de vibración del suelo de 0.2 Hz es necesario un tiempo de registro de 30 minutos como mínimo.
- 2) Colocar el sensor directamente en el suelo.
- 3) Una frecuencia de muestreo de 50 Hz es suficiente.

El equipo empleado para medir el ruido sísmico ambiental fue un sismógrafo Guralp GMG-6TD triaxial, de banda ancha y alta resolución, ideal para este tipo de mediciones por su practicidad, peso y dimensiones. Este sismógrafo tiene un periodo natural de 30 s y una respuesta en frecuencia de 0.03 a 100 Hz, que abarca el rango de interés de un estudio de ingeniería sísmica (0.1 a 20 Hz). Una vez localizado el punto en donde se requiere medir el ruido sísmico ambiental, la instalación del sensor se realiza de forma rápida mediante 3 pasos: orientar el sensor hacia el norte geográfico, nivelar el sensor y, por último, conectar el equipo a una batería y revisar mediante una computadora que la señal se registre de forma adecuada (Figura 13).

Se realizaron en total 86 mediciones de ruido en la zona de estudio, de las cuales 25 se realizaron en los sitios donde se establecieron los sondeos geotécnicos para correlacionar la información, y las demás se distribuyeron para abarcar áreas sin información geotécnica (Figura 14). La duración de los registros de ruido sísmico ambiental fue mayor a 120 minutos para evitar el ruido transitorio y tener información de mejor calidad. La frecuencia de muestreo de las señales se estableció en 100 Hz.

4.2 Procesamiento del ruido sísmico para obtener el cociente espectral H/V

El procesamiento de las señales de ruido sísmico ambiental para obtener el cociente espectral H/V se realizó con el software Geopsy, desarrollado por el proyecto SESAME (2004). El proceso para obtener el cociente espectral H/V es el siguiente (Figura 14):

- Primero, se seleccionan N ventanas de ruido estacionario, eliminando mediante un algoritmo “anti-trigger” el ruido transitorio producido por fuentes muy cercanas.
- Para cada ventana de ruido estacionario seleccionada se calcula el espectro de amplitud de Fourier y se realiza un suavizamiento. Este procedimiento se realiza para las tres componentes.
- Posteriormente, se promedian las componentes horizontales N y E para cada ventana.
- Con el espectro de amplitud de Fourier de la componente vertical (V) y del promedio de las componentes horizontales (H) se realiza el cociente espectral H/V para cada ventana.
- Por último, se calcula el promedio del cociente H/V.

Para el procesamiento de las señales de ruido sísmico se utilizaron los siguientes parámetros: ventanas de 81.92 s, se utilizó un traslape entre ventanas de 50 % y para el cálculo del promedio de las componentes horizontales se utilizó la ecuación

$$H(f) = \sqrt{\frac{N^2(f) + E^2(f)}{2}} \quad (4.1)$$

Para identificar la frecuencia de vibración del suelo y la amplificación relativa mediante el cociente espectral H/V se toma en cuenta el pico de mayor amplitud de la curva. Para el ejemplo de la Figura 16, la frecuencia de vibración es 2.98 Hz (periodo de 0.34 s) y la amplitud relativa es 6.86. El cociente espectral H/V de los 89 puntos de medición de ruido sísmico se puede consultar en el anexo A.

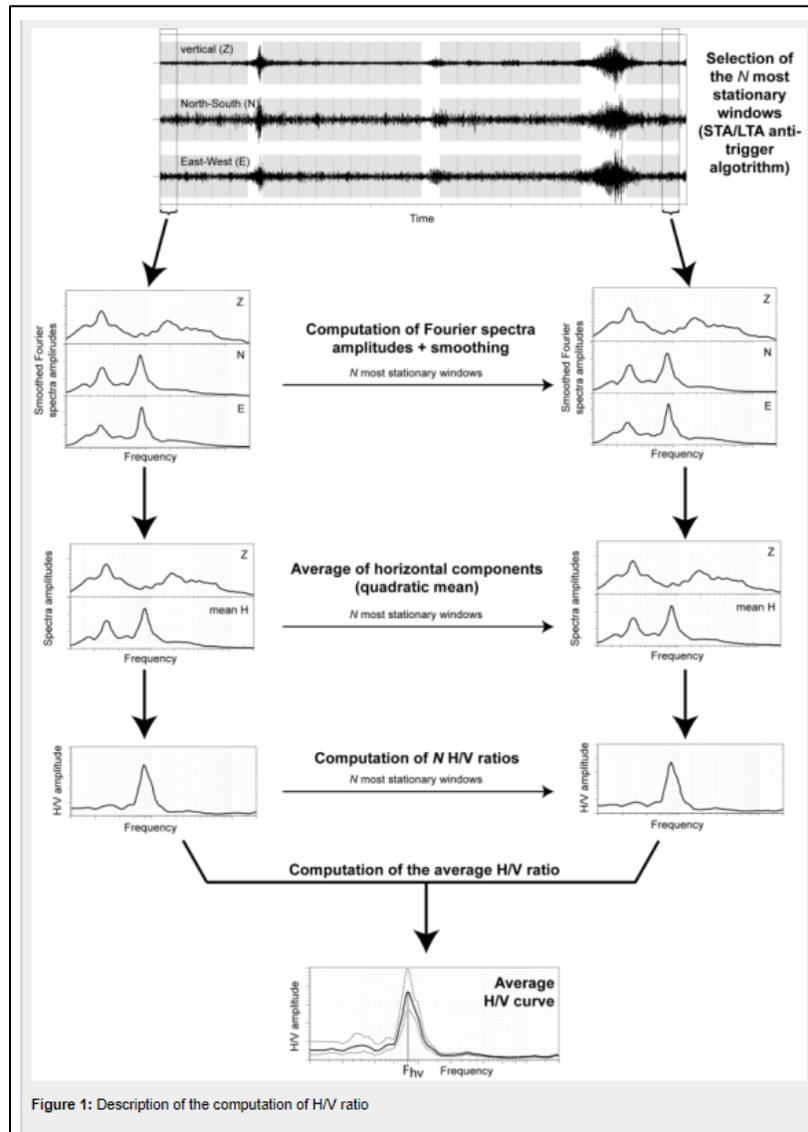


Figura 15. Diagrama del proceso para obtener el cociente espectral H/V. Tomada de SESAME (2004)

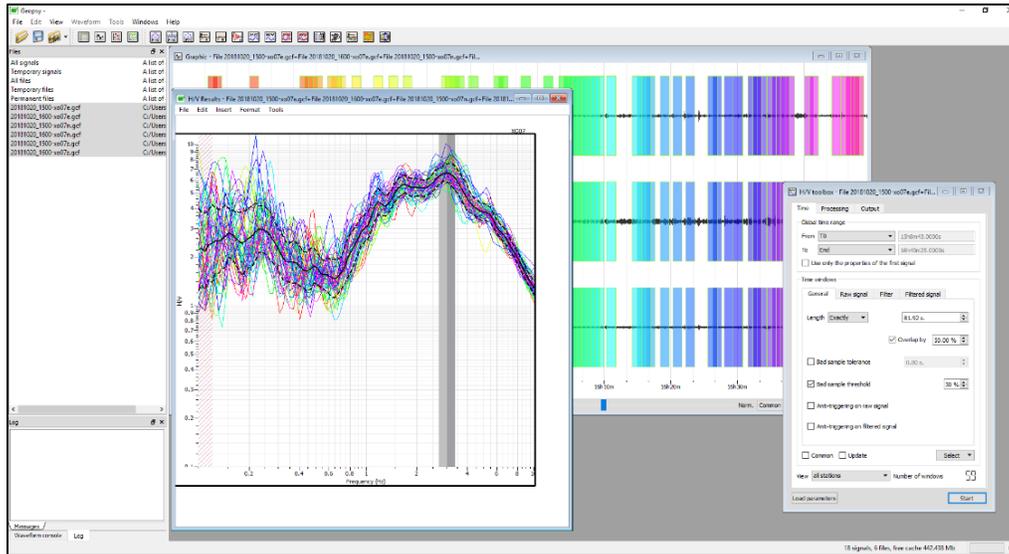


Figura 16. Ejemplo de procesamiento de ruido sísmico ambiental con el programa Geopsy para obtener el H/V. La señal corresponde a la medición realizada en el sondeo 2. El rango de frecuencia es de 0.1 a 10 Hz. Ambos ejes se presentan en escala logarítmica.

4.3 Modelos estratigráficos e inversión de las curvas espectrales H/V

La inversión del cociente espectral H/V se realizó con el software HV-Inv® (Piña-Flores et al., 2017) que realiza el cálculo directo e inverso del cociente espectral H/V considerando la teoría de los campos difusos. El software realiza la inversión por medio de métodos de optimización global (Monte Carlo, SimulatedAnnealing y ModifiedSimulatedAnnealing) y métodos de optimización local (Simplex Downhill e Interior Point). Para realizar la inversión se necesita un modelo de capas planas con los siguientes parámetros: espesor en m, velocidad de onda P en m/s, velocidad de onda S en m/s, densidad en Kg/m^3 y coeficiente de Poisson. Para cada parámetro se necesita un rango de valores mínimo y máximo de cada estrato considerado en el modelo.

La inversión de la curva H/V se realizó considerando la estratigrafía de los sondeos geotécnicos y la interpretación geológica de los perfiles geotécnicos. Para los cocientes H/V medidos sobre los sondeos geotécnicos la inversión se realizó con tres modelos de capas planas; el primero, considerando sólo los estratos que aparecen en los sondeos geotécnicos y, el segundo, considerando una capa de mayor profundidad para realizar un mejor ajuste a la curva H/V.

Conforme a la información de los 26 sondeos geotécnicos, se pudieron diferenciar 2 principales estratigrafías con diferentes parámetros. Para el primer parámetro de inversión, se determinó con un modelo de 2 capas y un semiespacio: la primera capa corresponde a la unidad de relleno y piedemonte, la segunda capa corresponde a la brecha basáltica la tercera capa corresponde al semiespacio. Los parámetros utilizados para la inversión se muestran en la Tabla 1.

Capa	Espesor [m]		Vp [m/s]		Vs [m/s]		Densidad [kg/m ³]		Coeficiente de Poisson	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
1	1	15	200	700	100	300	1200	1700	0.1	0.45
2	50	600	600	1600	400	800	1500	2000	0.1	0.45
3	-	-	1100	2200	500	1000	1700	2200	0.1	0.45

Tabla 1. Valores de los parámetros para realizar la inversión H/V.

El segundo parámetro de inversión se estableció con un modelo de 4 capas y un semiespacio: la primera capa corresponde a la unidad de relleno asfáltico, la unidad de limos y gravillas, la segunda capa corresponde a la unidad de arena volcánica, la tercera corresponde a la unidad de arcilla lacustre, la cuarta unidad corresponde a la brecha basáltica y finalmente el semiespacio (Tabla 2).

Capa	Espesor [m]		Vp [m/s]		Vs [m/s]		Densidad [kg/m ³]		Coeficiente de Poisson	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
1	1	10	200	700	100	300	1200	1800	0.1	0.45
2	1	15	400	500	200	600	1300	1600	0.1	0.45
3	10	60	100	250	80	120	1000	1400	0.1	0.45
4	100	400	600	1800	300	800	1700	2200	0.1	0.45
5	-	-	1000	3000	500	1500	2000	2500	0.1	0.45

Tabla 2. Valores de los parámetros para realizar la inversión H/V.

Para evitar el problema de la no unicidad de soluciones que se presenta siempre que se realiza una inversión, el software HV-Inv® permite realizar la inversión conjunta del cociente H/V con la curva de dispersión. En este trabajo, para evitar el referido problema, primero se realizaron las inversiones de los H/V en donde había información de sondeos geotécnicos. Como se tiene conocimiento del espesor de los estratos se fijó este valor en los parámetros de entrada del software.

Después se realizó la inversión de los demás cocientes utilizando como modelo inicial el obtenido para los H/V de los sondeos. Siguiendo esta metodología se obtuvieron los valores de Vs, Vp y densidad para cada capa del modelo considerado, aunque en este trabajo sólo se presenta el valor de la velocidad de corte por ser el de mayor confiabilidad. En la Figura 17 y Figura 17 se muestra como ejemplo el proceso para realizar la inversión del cociente S-02.

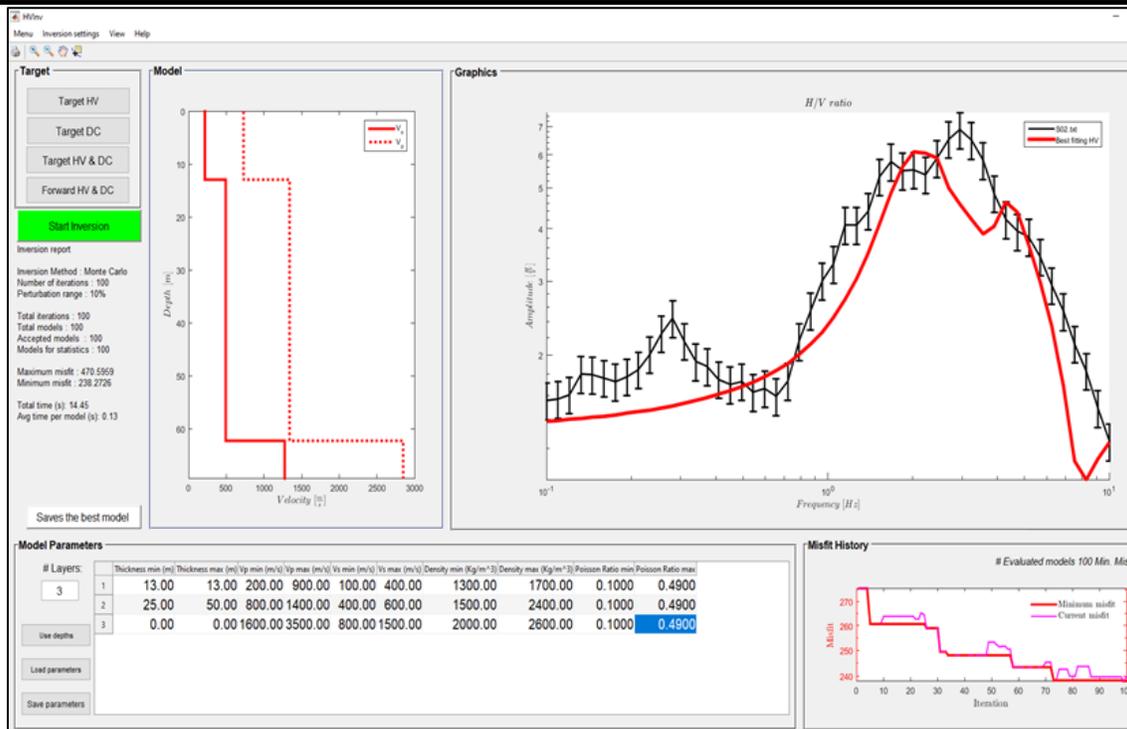


Figura 17. Proceso de inversión del cociente espectral en el software HV-Inv. Se muestra la interfaz gráfica del programa

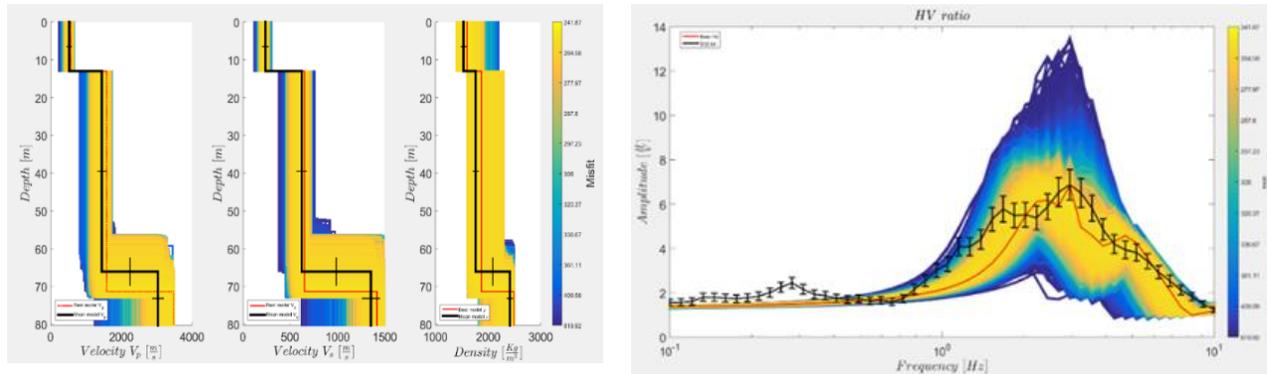


Figura 18. Proceso de inversión del cociente espectral en el software HV-Inv. A la izquierda se presentan los perfiles de V_s , V_p y densidad resultada de la inversión. A la derecha se presentan las curvas H/V resultado de las inversiones.

4.4 Familias H/V, perfiles de velocidades de corte (V_s) 1-D y relación con sondeos geotécnicos

Con el resultado del procesado de los datos de ruido sísmico ambiental, se obtuvieron 75 puntos de medición de ruido sísmico ambiental, así como los perfiles de velocidad de corte 1-D de los H/V seleccionados para cada familia. Por su forma de onda se pudo hacer una clasificación de la zona de estadio al establecer 6 familias y un grupo de curvas anómalas. Las formas de onda se pueden consultar en los anexos A para cada familia, incluyendo su perfil de espesores y su inversión realizada para su posterior análisis en este reporte.

La familia 1 consiste en 4 curvas H/V que muestran dos respuestas espectrales bien definidas: la primera a baja frecuencia (0.2 Hz a 0.25 Hz) y la segunda a alta frecuencia en un rango de 3.5 a 8 Hz. Cabe señalar que la amplitud máxima de este grupo varía de 4 a 5 veces.

La respuesta a baja frecuencia se relaciona con estratos a una profundidad mayor que el objetivo de este estudio, por lo tanto, no se tomó en cuenta para el análisis de este reporte. La respuesta a alta frecuencia está directamente relacionada con la estratigrafía superficial, la cual es analizada en este trabajo. En la Figura 19 se muestran los 4 H/V de la familia 1. En el Anexo A se pueden consultar los cocientes espectrales individualmente.

En la Figura 19 se aprecian los perfiles de velocidad de onda de corte, así como los cocientes seleccionados del grupo de la familia 1. Las velocidades de onda de corte y el espesor de las capas consideradas para el grupo A oscilan entre los siguientes valores:

- Para la primera capa, conformada por el piedemonte, se obtuvieron velocidades en un rango de 100 a 230 m/s. El espesor oscila entre 5 y 10 m.
- Para la segunda capa, conformada por brecha basáltica, las velocidades se ubican en un rango de 450 a 500 m/s. El espesor varía de 30 a 90 m. Debido a que los sondeos geotécnicos de estos puntos de medición llegaron a un máximo de 20 m, se propuso que para esta unidad estratigráfica tuviera un espesor de 100 m.
- Para el semiespacio, definido como basalto, la velocidad oscila entre 550 y 800 m/s. La variación de la velocidad es mayor debido a la gran amplificación que muestran algunos de los cocientes espectrales de esta familia, consecuencia de un gran contraste de impedancias. Se propone que para el contraste de impedancia entre esta unidad y la anterior, se observa en la amplitud a bajas frecuencias (entre 0.2 y 0.3 Hz) en las curvas de cocientes espectrales.

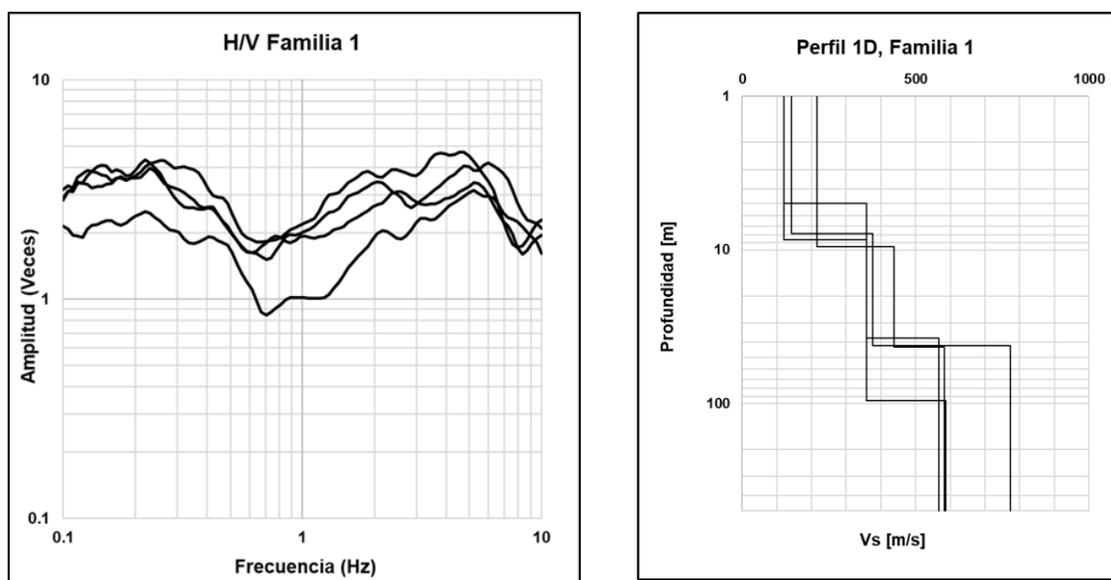


Figura 18. De lado izquierdo, Cocientes espectrales de la familia 1. Lado derecho, perfiles 1-D de inversión de la familia 1.

Para la familia 2 se clasificaron 16 cocientes espectrales, que al igual que a familia 1, muestran dos respuestas espectrales definidas: la primera a baja frecuencia (0.2 Hz a 0.25 Hz) y la segunda a alta frecuencia en un rango de 1.7 a 3.2 Hz. La amplitud máxima de este grupo varía de 3 a 7.

La respuesta a baja frecuencia se relaciona con estratos a una profundidad mayor que el objetivo de este estudio, por lo tanto, no se tomó en cuenta para el análisis de este reporte. La respuesta a alta frecuencia está directamente relacionada con la estratigrafía superficial, la cual es analizada en este trabajo. En la Figura 20 se muestran los 16 H/V de la familia 2. En el Anexo A se pueden consultar los cocientes espectrales individualmente.

Las mediciones de ruido sísmico para la familia 2, tenemos las curvas espectrales: S-02, S-07, S-09, S-12, S-14, S-17 y S-20, donde se realizaron sobre los respectivos sondeos. Con la información geotécnica de los sondeos, se determinó un modelo estratigrafía para elaborar un parámetro de inversión para obtener perfiles de velocidades de corte.

En la Figura 20 se aprecian los perfiles de velocidad de onda de corte para todos los cocientes seleccionados de la familia 2. Las velocidades de onda de corte y el espesor de las capas consideradas para este grupo oscilan entre los siguientes valores:

- Para la primera capa, conformada por el piedemonte, se obtuvieron velocidades en un rango de 100 a 350 m/s. El espesor oscila entre 5 y 15 m.
- Para la segunda capa, conformada por brecha basáltica, las velocidades se ubican en un rango de 320 a 535 m/s. El espesor varía de 20 a 60 m. Debido a que los sondeos geotécnicos de estos puntos de medición llegaron a un máximo de 20 m, se propuso que para esta unidad estratigráfica tuviera un espesor de 100 m.
- Para el semiespacio, definido como basalto, la velocidad oscila entre 500 y 1100 m/s. La variación de la velocidad es mayor debido a la gran amplificación que muestran algunos de los cocientes espectrales de esta familia, consecuencia de un gran contraste de impedancias. Se propone que para el contraste de impedancia entre esta unidad y la anterior, se observa en la amplitud a bajas frecuencias (entre 0.2 y 0.3 Hz) en las curvas de cocientes espectrales.

Este mismo modelo estratigráfico se usó para la inversión de las curvas H/V de la familia 1, debido a que comparten la misma forma de las curvas espectrales, solamente cambia el rango de frecuencias de las familias.

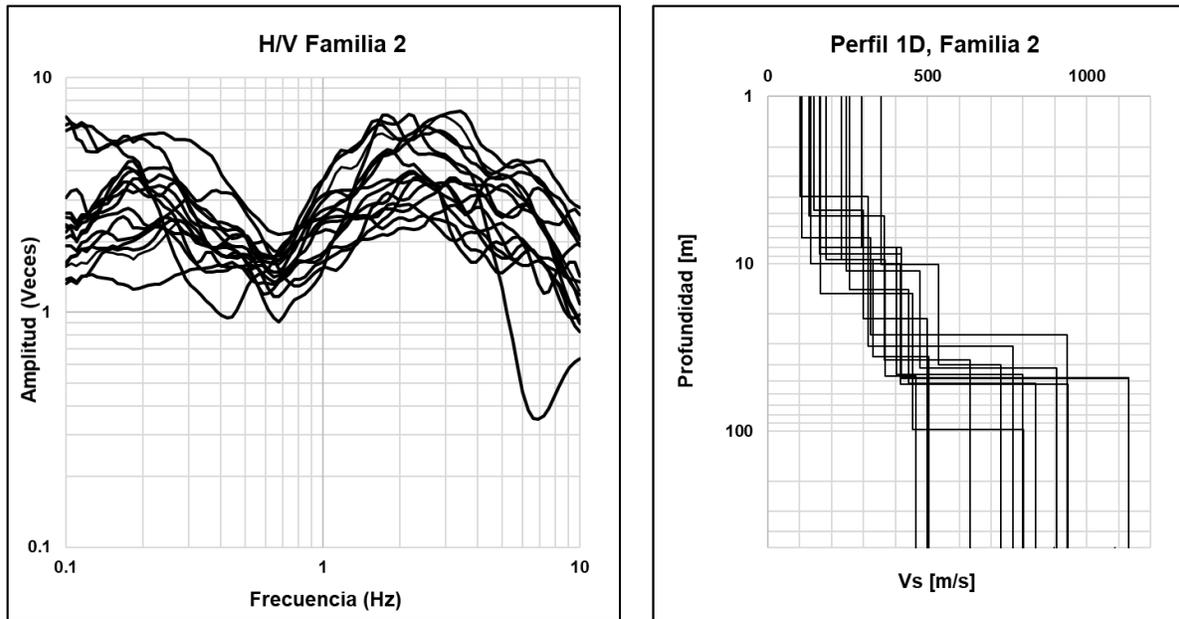


Figura 20. De lado izquierdo, Cocientes espectrales de la familia 2. Lado derecho, perfiles 1-D de inversión de la familia 2.

La familia 3 consiste en 3 cocientes espectrales H/V, este grupo consta de una respuesta espectral entre 1 Hz y 1.5 Hz. Con una amplitud máxima entre 1.5 y 3.6 veces. En la Figura 21 se muestran las 5 curvas H/V de la familia 3. En el Anexo A se pueden consultar los cocientes espectrales individualmente.

Para el caso de los perfiles de velocidad de onda de corte para los cocientes espectrales de los grupos de la familia 3 (Figura 21), se construyeron con respecto a la información de la Tabla 2, donde se consideran 4 capas y un semiespacio, este mismo modelo estratigráfico fue usado para las familias restantes. Las velocidades de onda de corte y el espesor de las capas consideradas para el grupo oscilan entre los siguientes valores:

- Para la primera capa, considerada como rellenos superficiales y limo, la velocidad de onda de corte varía en un rango de 269 a 300 m/s. El rango de espesores va de 1 a 2 m.
- La segunda capa, considerada como arena volcánica, tiene velocidades de onda de corte de 530 a 600 m/s. El espesor varía en un rango de 1 a 2 m.
- La tercera capa, considerada como depósitos de arcilla lacustre, tiene velocidades que oscilan entre 80 y 120 m/s. El rango de espesores varía de 10 a 20 m.
- La cuarta capa, considerado como brecha basáltica, tiene velocidades de onda de corte de 400 a 500 m/s. El rango de espesores de esta unidad litológica varía de 300 a 400 m.

- El semiespacio, considerado como basalto, tiene velocidades de onda de corte de 490 m/s a 1000 m/s.

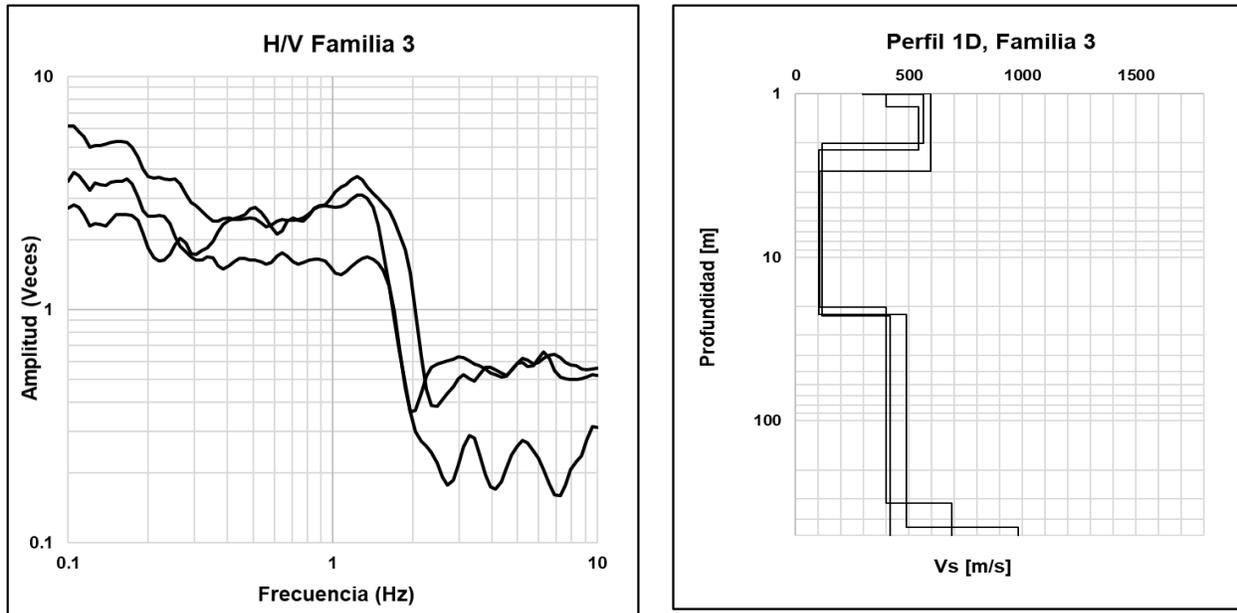


Figura 21. De lado izquierdo, Cocientes espectrales de la familia 3. Lado derecho, perfiles 1-D de inversión de la familia 3.

La familia 4 consiste en 10 curvas espectrales H/V, este grupo tiene una respuesta espectral entre 0.6 Hz y 0.7 Hz, con una amplitud máxima entre 2.5 a 6 veces. En la Figura 22 se muestran las 12 curvas H/V de la familia 4. En el Anexo A se pueden consultar los cocientes espectrales individualmente.

Para el grupo de la Familia 4, las velocidades de onda de corte y el espesor de las capas consideradas para el grupo oscilan entre los siguientes valores (Figura 22):

- Para la primera capa, considerada como rellenos superficiales y limo, la velocidad de onda de corte varía en un rango de 190 a 300 m/s. El rango de espesores va de 1 a 2 m.
- La segunda capa, considerada como arena volcánica, tiene velocidades de onda de corte de 320 a 600 m/s. El espesor varía en un rango de 1 a 4 m.
- La tercera capa, considerada como depósitos de arcilla lacustre, tiene velocidades que oscilan entre 90 y 120 m/s. El rango de espesores varía de 10 a 40 m.
- La cuarta capa, considerado como brecha basáltica, tiene velocidades de onda de corte de 350 a 690 m/s. El rango de espesores de la unidad litológica varía de 100 a 400 m.

- El semiespacio, considerado como basalto, tiene velocidades de onda de corte de 490 m/s a 1000 m/s.

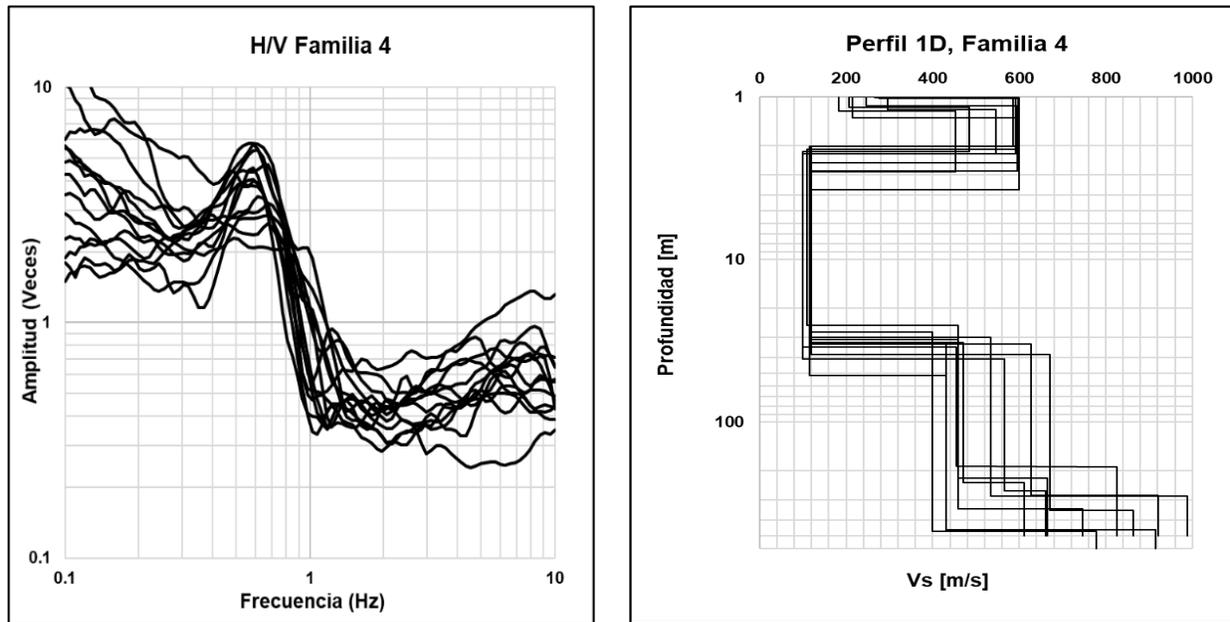


Figura 22. De lado izquierdo, Cocientes espectrales de la familia 4. Lado derecho, perfiles 1-D de inversión de la familia 4.

La familia 5 consiste en 12 curvas espectrales H/V, este grupo tiene una respuesta espectral entre 0.46 Hz y 0.55 Hz, con una amplitud máxima entre 3.5 a 12 veces. En la Figura 23 se muestran las 12 curvas H/V de la familia 5. En el Anexo A se pueden consultar los cocientes espectrales individualmente. En las mediciones de ruido sísmico para la familia 5, tenemos las curvas espectrales: S-05 y S-11, donde se realizaron sobre los respectivos sondeos. Para la familia 5, las velocidades de onda de corte y el espesor de las capas consideradas para este grupo oscilan entre los siguientes valores (Figura 23):

- Para la primera capa, considerada como rellenos superficiales y limo, la velocidad de onda de corte varía en un rango de 250 a 300 m/s. El rango de espesores va de 1 a 2 m.
- La segunda capa, considerada como arena volcánica, tiene velocidades de onda de corte de 390 a 550 m/s. El espesor varía en un rango de 1 a 4 m.
- La tercera capa, considerada como depósitos de arcilla lacustre, tiene velocidades que oscilan entre 90 y 120 m/s. El rango de espesores varía de 30 a 40 m. Debido a que en esta zona no se elaboraron sondeos geotécnicos, a este grupo se la asignó una profundidad máxima de 40 m.

- La cuarta capa, considerado como brecha basáltica, tiene velocidades de onda de corte de 400 a 620 m/s. El rango de espesores de esta unidad litológica varía de 200 a 400 m.
- El semiespacio, considerado como basalto, tiene velocidades de onda de corte de 490 m/s a 1000 m/s.

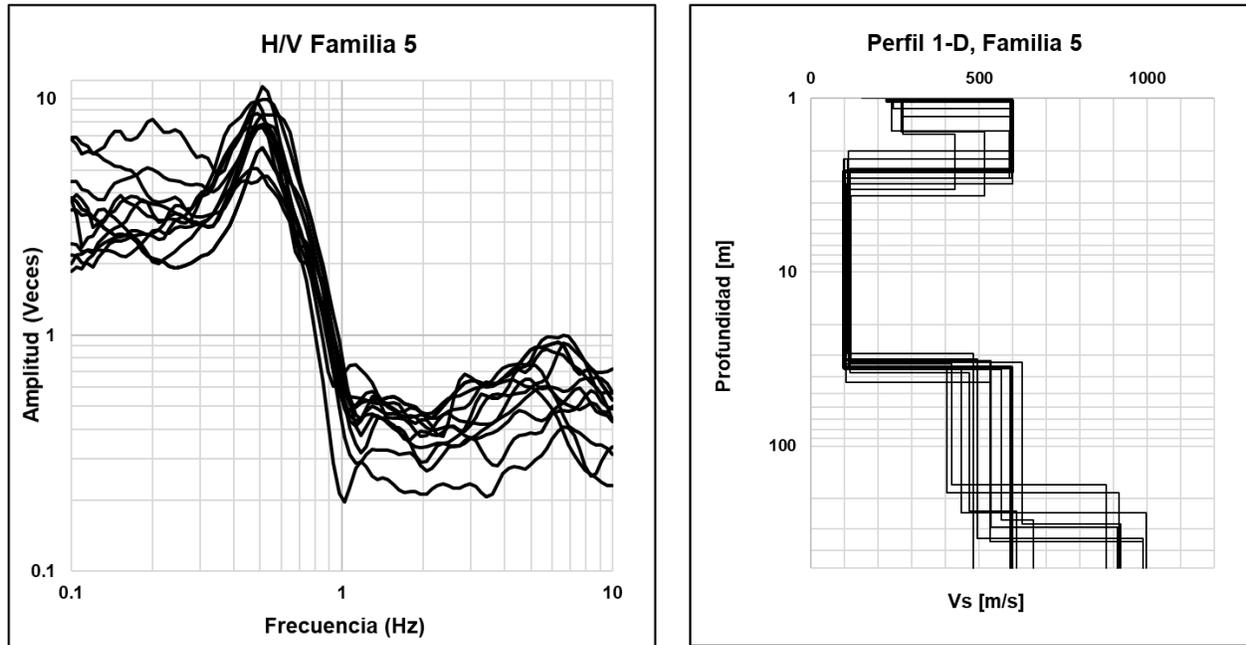


Figura 23. De lado izquierdo, Cocientes espectrales de la familia 5. Lado derecho, perfiles 1-D de inversión de la familia 5.

La familia 6 consiste en 16 curvas espectrales H/V, este grupo tiene una respuesta espectral entre 0.35 Hz y 0.45 Hz, con una amplitud máxima entre 2 a 13 veces. En la Figura 24 se muestran las 16 curvas H/V de la familia 5. En el Anexo A se pueden consultar los cocientes espectrales individualmente. Para esta familia se clasificó a la curva espectral S-22, donde se realizó sobre ese sondeo. Con la información geotécnica de los sondeos, se determinó un modelo estratigrafía para elaborar un parámetro de inversión para obtener perfiles de velocidades de corte. Los perfiles 1-D de la familia 6, las velocidades de onda de corte y el espesor de las capas consideradas para este grupo oscilan entre los siguientes valores (Figura 24):

- Para la primera capa, considerada como rellenos superficiales y limo, la velocidad de onda de corte varía en un rango de 250 a 300 m/s. El rango de espesores va de 1 a 2 m.
- La segunda capa, considerada como arena volcánica, tiene velocidades de onda de corte de 390 a 550 m/s. El espesor varía en un rango de 1 a 5 m.

- La tercera capa, considerada como depósitos de arcilla lacustre, tiene velocidades que oscilan entre 90 y 120 m/s. El rango de espesores varía de 30 a 50 m. Debido a que en esta zona no se elaboraron sondeos geotécnicos, a este grupo se la asignó una profundidad máxima de 60 m.
- La cuarta capa, considerado como brecha basáltica, tiene velocidades de onda de corte de 400 a 620 m/s. El rango de espesores de esta unidad litológica varía de 200 a 400 m.
- El semiespacio, considerado como basalto, tiene velocidades de onda de corte de 450 m/s a 1000 m/s.

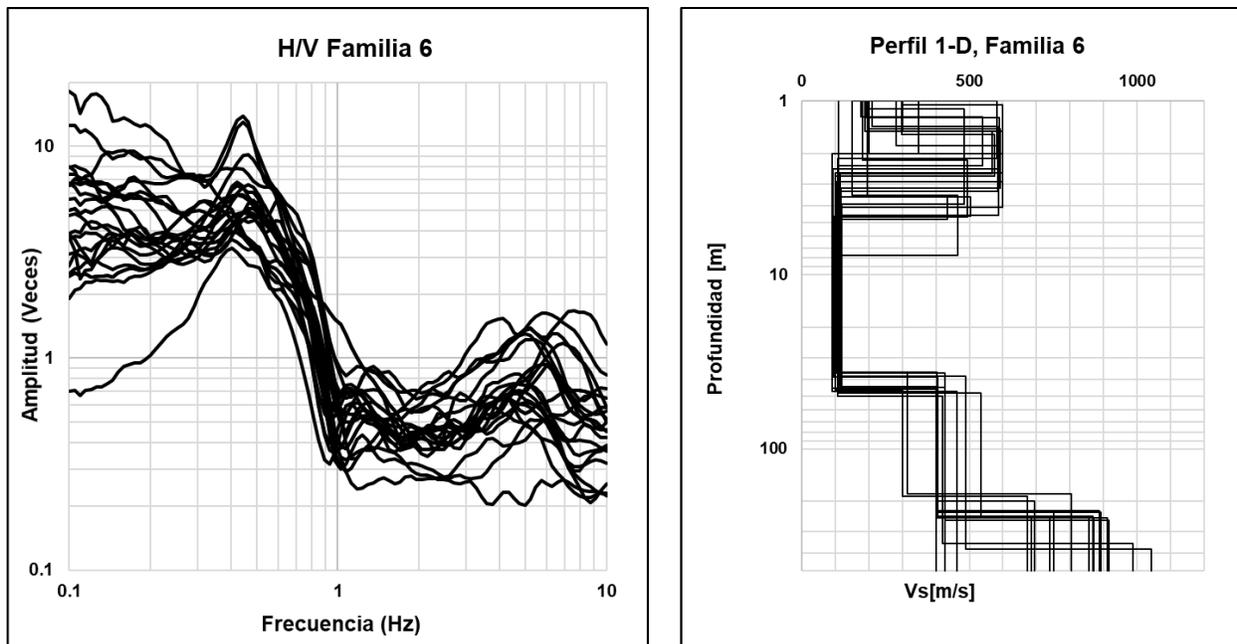


Figura 24. De lado izquierdo, Cocientes espectrales de la familia 6. Lado derecho, perfiles 1-D de inversión de la familia 6.

También se consideró a una familia, que, por su forma espectral, no fue posible determinar una frecuencia dominante, por lo tanto, estas curvas se agruparon en un grupo anómalo. Esta familia anómala presenta una amplitud de entre 2 a 5 veces. En la Figura 25 se muestran las 19 curvas H/V de la familia anómala. En el Anexo A se pueden consultar los cocientes espectrales individualmente.

Con respecto a esta familia, se realizaron las inversiones conforme a la información geotécnica de las mediciones de cocientes espectrales H/V realizados sobre los sondeos, ya que para la familia 5 tenemos 2 curvas espectrales pertenecientes a los sondeos S-05 y S-11. Además, el sondeo S-22 se clasificó en la familia 6. Los sondeos geotécnicos que se clasificaron en la familia anómala presentan información geotécnica similar a la de los sondeos antes mencionados. También la forma espectral de la familia anómala es parecida a las curvas de las

familias 3, 4, 5 y 6. Por lo tanto, se consideró usar el modelo de la Tabla 2 para las inversiones. Las velocidades de onda de corte y el espesor de las capas consideradas para el grupo oscilan entre los siguientes valores (Figura 25):

- Para la primera capa, considerada como rellenos superficiales y limo, la velocidad de onda de corte varía en un rango de 250 a 300 m/s. El rango de espesores va de 1 a 5 m.
- La segunda capa, considerada como arena volcánica, tiene velocidades de onda de corte de 390 a 550 m/s. El espesor varía en un rango de 1 a 3 m.
- La tercera capa, considerada como depósitos de arcilla lacustre, tiene velocidades que oscilan entre 90 y 120 m/s. El rango de espesores varía de 10 a 25 m. Debido a que en esta zona no se elaboraron sondeos geotécnicos, a este grupo se la asignó una profundidad máxima de 40 m.
- La cuarta capa, considerado como brecha basáltica, tiene velocidades de onda de corte de 400 a 620 m/s. El rango de espesores de esta unidad litológica varía de 100 a 300 m.
- El semiespacio, considerado como basalto, tiene velocidades de onda de corte de 450 m/s a 1000 m/s.

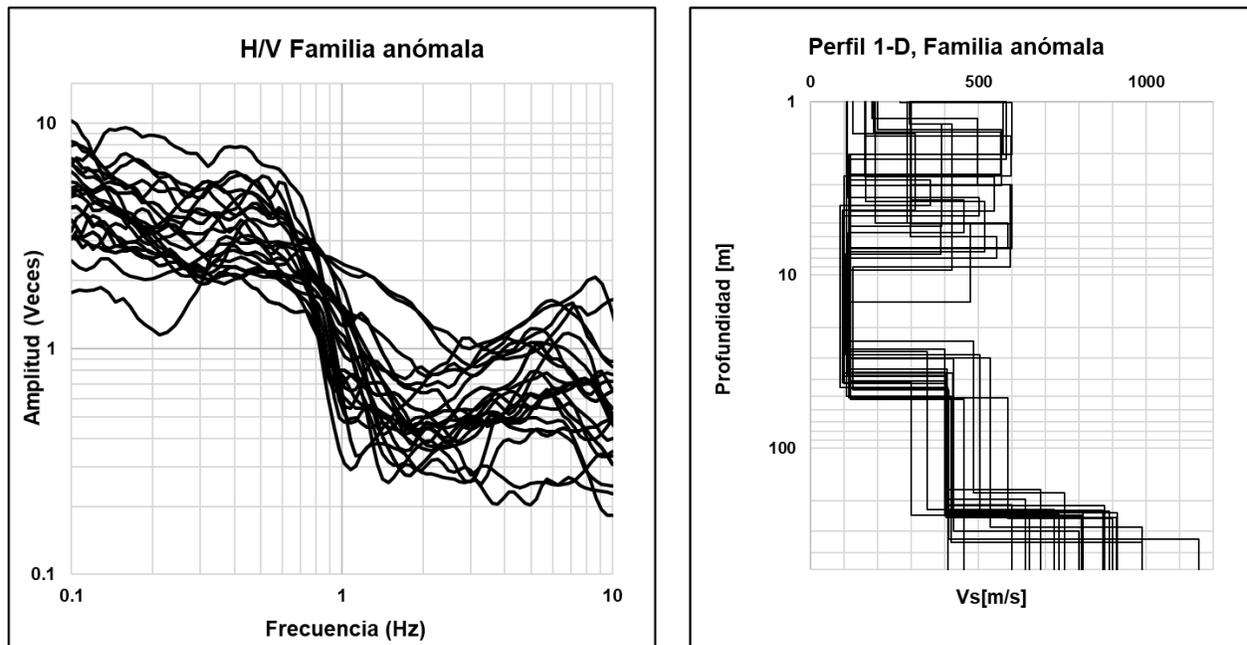


Figura 25. De lado izquierdo, Cocientes espectrales de la familia anómala. Lado derecho, perfiles 1-D de inversión de la familia anómala.

5. RESULTADOS

5.1 Mapa de periodo del suelo

El cociente espectral H/V permite estimar el periodo del sitio y en muchos casos inferir la estratigrafía con la que se puede calcular el efecto de sitio para escenarios específicos. Algunos cocientes H/V no muestran un periodo dominante claro, pero se puede determinar por la similitud en forma con otros cocientes espectrales y la cercanía espacial.

Para la familia 1 y 2 se determinó el periodo de vibración del suelo considerando la respuesta a alta frecuencia. Para las familias 3,4,5 y 6 se considera la respuesta a baja frecuencia para determinar el periodo de vibración.

En el caso de la familia denominada anómala, se mencionó que no se pudo determinar su frecuencia fundamental. Para poder establecer una frecuencia en estas curvas, se basó en las inversiones de las curvas H/V. Como ya se mencionó, el parámetro de inversión de esta familia fue el mismo de las familias 3, 4, 5 y 6, y también se contó con la información a profundidad de los sondeos geotécnicos. El HV Inv® busca ajustar al modelo con menor error y conforme a esto, al finalizar los ajustes determinados, el programa muestra visualmente una frecuencia fundamental, con cierta amplitud. Con base a esto se pudo definir la frecuencia fundamental para los cocientes espectrales del grupo definido como anómalo (Figura 26). Para las mediciones de las curvas H/V que no pertenecen a los sondeos, se les asignó su frecuencia fundamental también con ayuda de las inversiones y con la clasificación de las familias.

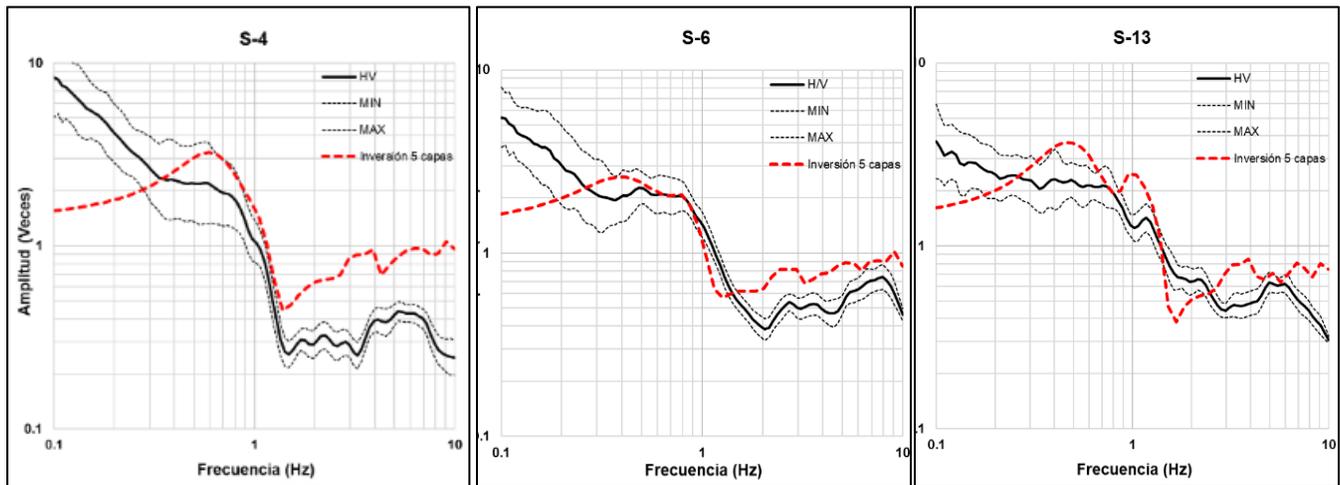


Figura 26. Ejemplos de algunos cocientes espectrales donde visualmente no se pudo determinar su frecuencia fundamental. En color negro representa la curva H/V y en color rojo representa el mejor ajuste a la curva espectral del H/V

En la Figura 27 se observa el mapa de periodos de vibración del suelo para el área de estudio determinado mediante la evaluación de los cocientes H/V. La parte sur de la zona de estudio presenta periodos menores a 0.6 s, por lo que se considera como zona de lomas. Este resultado concuerda con la geología que considera un derrame basáltico proveniente de la sierra de Chichinautzin y que alcanza su límite justo hasta donde se ubica la carretera.

Del límite que marca la carretera (Al este de la Figura 27) hacia el norte hay un cambio abrupto en los valores de periodo, pasando de zona de lomas (0 s-0.6 s) a zona de lago (>1.0 s) con una zona de transición (0.6-1.0 s) casi inexistente. Cabe resaltar lo siguiente de esta zona de transición abrupta de periodo; al oeste de la carretera, el periodo cambia de 0.6 s a 1.1 s en una distancia menor a los 30 m y que al centro, en un tramo de 100 m aproximadamente, el periodo varía de forma más suave justo en donde no se presenta agrietamiento. Por lo tanto, el agrietamiento se presenta justo en la zona de cambio abrupto de periodo de vibración del suelo. Hacia el norte los periodos son mayores a 1.0 s, por lo que se considera como zona de lago.

Para la parte Oeste de la Figura 27 los periodos de vibración del suelo para la Zona de los embarcaderos de Zacapa, el periodo varía entre los intervalos de 0 s a 0.6 s, se extiende hacia la zona centro del lugar, casi al llegar al restaurante Los manantiales (LM-C). Esta zona de loma puede ser un derrame lateral originado de la sierra del Chichinautzin.

El periodo asignado a la zona de transición (0.6-1.0 s), nótese que no es tan abrupta como en la zona de la carretera Xochimilco-Tulyehualco. Se muestra también que cierto agrietamiento principal se encuentra en la zona de transición, Por lo tanto, el agrietamiento se presenta en la zona de cambio de periodo de vibración del suelo.

Para la parte central del mapa hacia el norte, se observan periodos mayores a 1 s, y a esta zona se le considera zona de lago, igualmente establecidos estos valores para la zona de la carretera.

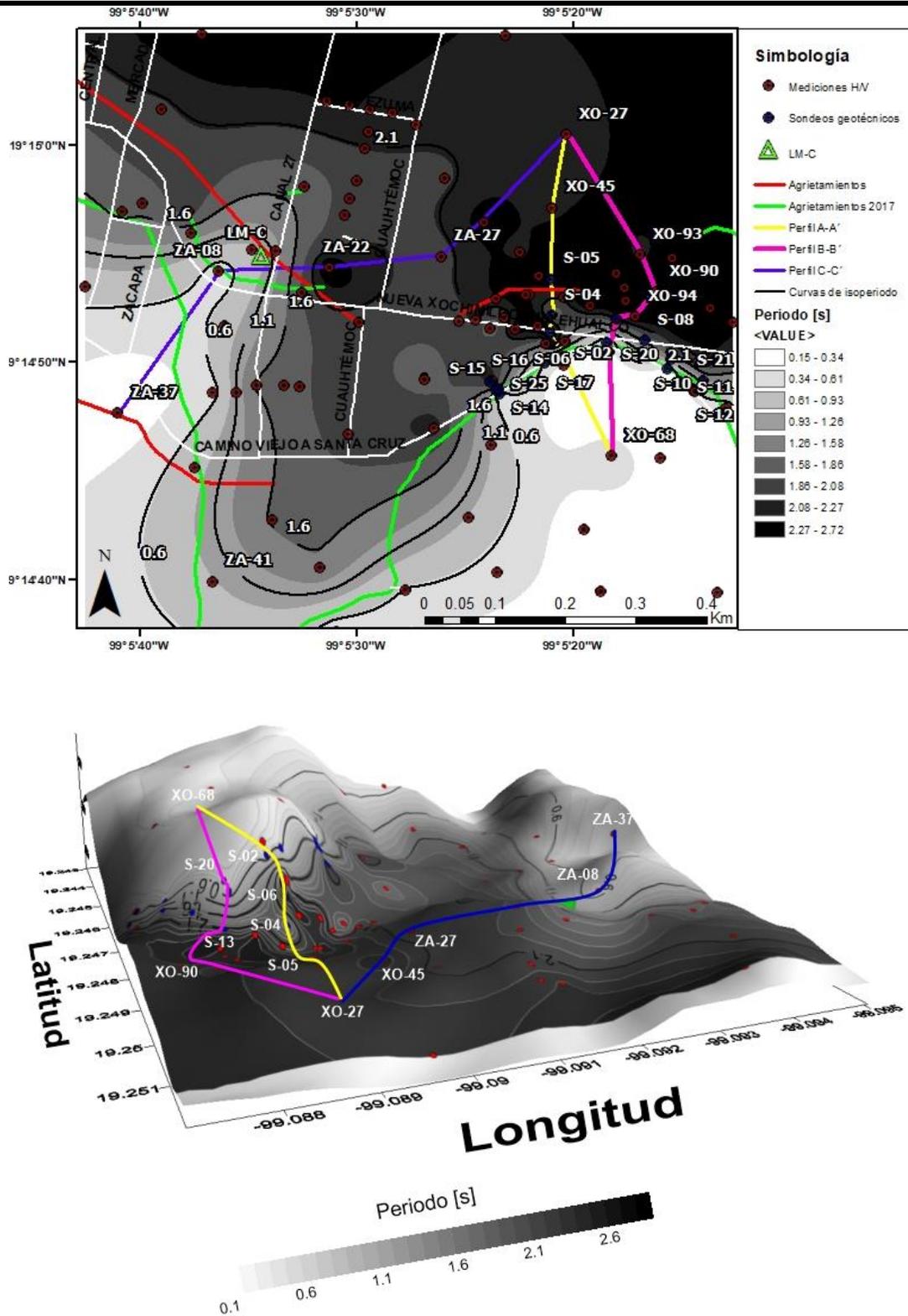


Figura 27. Mapa de periodos de toda el área de estudio. Mapa superior vista en planta, mapa inferior vista 3-D. Líneas rojas y verdes corresponden a las grietas reportadas. Línea amarilla representa el perfil A-A'. Línea magenta representa al perfil B-B'. Finalmente, la línea azul representa el perfil C-C'.

4.2 Mapa de espesores.

Con el objetivo de determinar el límite de la brecha basáltica de la Sierra del Chichinautzin, se elaboraron 2 mapas de espesores con diferentes metodologías de caracterización, así como determinar si hay relación con el mapa de periodos de la Figura 27, donde sobresalen 3 zonas donde el periodo en esos puntos fue alto. Algunos de estas zonas con valores altos de periodo se pueden comparar con los sondeos geotécnicos, sobretodo en la zona de la carretera. Para la zona de los embarcaderos no hubo sondeos geotécnicos, pero si pueden ser comparables con la clasificación de las familias.

El mapa de espesores de la Figura 28 se realizó conforme a la información obtenida de las inversiones con el software HVInv®, para realizarlo se tomó como parámetro el contraste de impedancias entre capas.

Para la zona definida como loma, se diferenció entre el contraste de impedancias de la capa de piedemonte y la brecha basáltica proveniente de la Sierra del Chichinautzin. El periodo de vibración de esta zona está en un intervalo de entre 0 s a 0.6 s. Los valores de los espesores de la zona de loma se pueden revisar individualmente en el anexo A.

Para la zona de transición, se definió por el contraste entre la capa de arcilla y la brecha basáltica. El periodo de vibración de la zona está en el intervalo entre 0.6 s a 1 s. El valor de los espesores de la zona de loma se puede revisar individualmente en el anexo A.

Para la zona de lago, está definida por el contraste entre la capa de arcilla y la brecha basáltica. El periodo de vibración es mayor a 1s. Los valores de los espesores de la zona se pueden revisar individualmente en el anexo A.

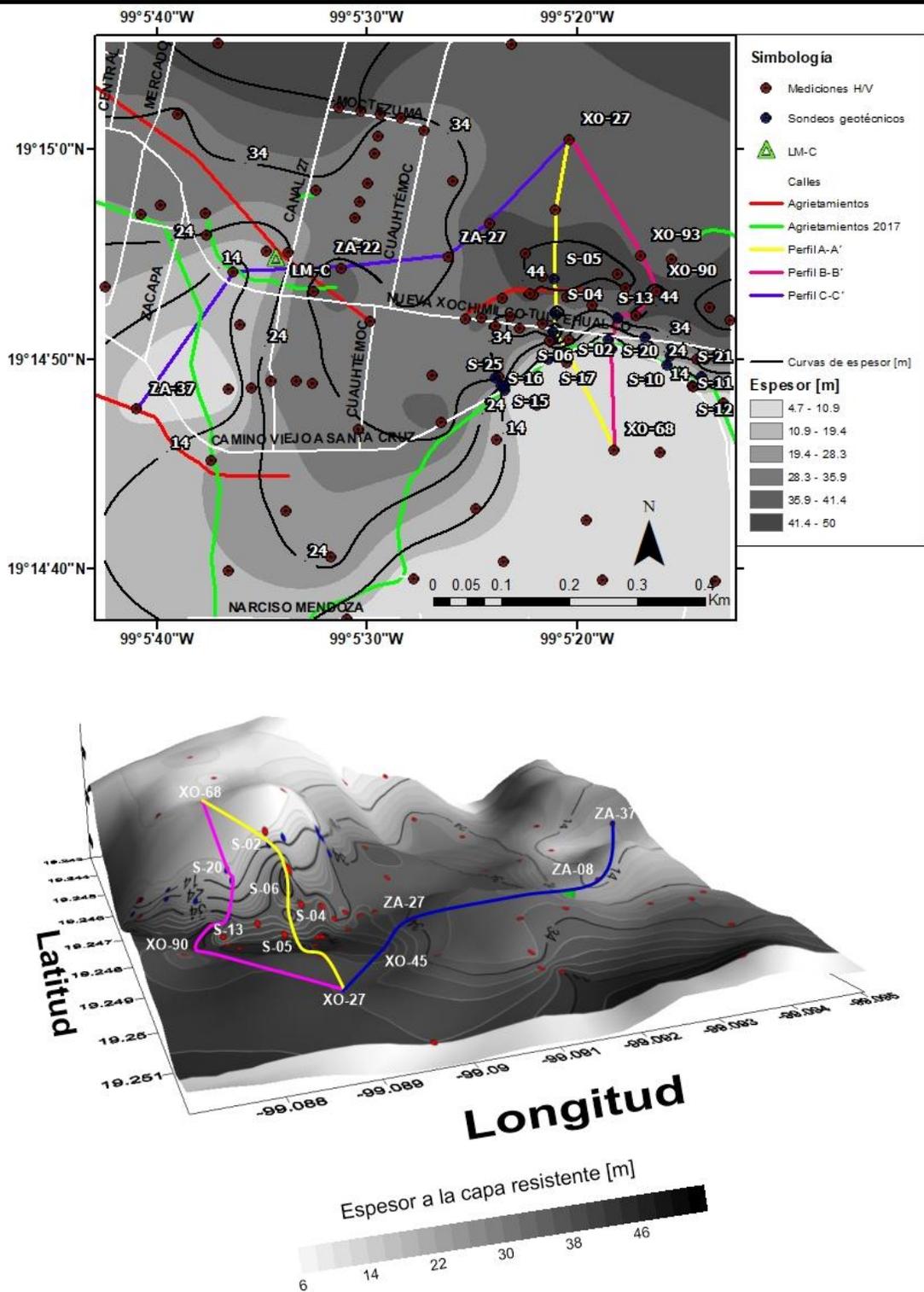


Figura 28. Mapa de espesores realizado con el HV Inv de toda el área de estudio. Mapa superior visto en plata, mapa inferior visto en 3-D. Líneas rojas y verdes corresponden a las grietas reportadas. Línea amarilla representa el perfil A-A'. Línea magenta representa al perfil B-B'. Finalmente, la línea azul representa el perfil C-C'.

Para el segundo mapa, los espesores se determinaron con una fórmula, que establece una relación con la frecuencia de vibración del suelo, obtenida mediante el cociente espectral H/V con el espesor de los sedimentos en el sitio.

En sitios con alto contraste de impedancia entre los suelos blandos y los depósitos profundos se ha encontrado que la frecuencia de vibración del suelo, obtenida mediante el cociente espectral H/V, se correlaciona bien con el espesor de los sedimentos en el sitio. En general, la frecuencia y el espesor se relacionan por medio de una función empírica no lineal que en términos del periodo da como resultado la siguiente ecuación (Lermo *et al.*, 2019).

$$H_s = a * T_0^b$$

Donde H_s representa el espesor del suelo blando o la profundidad a los depósitos profundos, T_0 el periodo obtenido mediante el cociente H/V, mientras que a y b son constantes. En diversos trabajos (Ibs-von Seht y Wohleberg, 1999; Parolai *et al.*, 2002; entre otros) se relaciona el periodo de vibración del suelo, obtenido mediante mediciones de ruido sísmico ambiental, y el espesor de los sedimentos, con información recabada de sondeos geotécnicos y perfiles geológicos. En estos estudios se ha encontrado que la relación entre el periodo y el espesor ofrece una buena aproximación al espesor real de los sedimentos, en especial cuando el contraste de impedancias es alto.

Para el Valle de México se han realizado relaciones entre el periodo de vibración del suelo y la profundidad a los depósitos profundos similares. Aguilar *et al.* (2003) relacionan las propiedades dinámicas del suelo de la zona central de la ciudad para aproximadamente 360 puntos. Encuentran que el espesor de los suelos compresibles (H_s) y el periodo de vibración (T_0) se relacionan por medio de la siguiente ecuación.

$$H_s = 31(T_0 - 0.5)^{0.5}$$

Por otro lado, Avilés *et al.* (2010), con información de 100 estaciones sísmicas y alrededor de 500 mediciones de microtemores, construye un mapa de isoperiodos para la Ciudad de México. Ellos realizan mediciones de la subsidencia en la ciudad de México para 960 puntos e interpolan en cada uno de ellos el valor del periodo de mapa que obtuvieron y, con ayuda de un mapa de profundidad a los depósitos profundos, interpolan también el valor de H_s . Con esta información, la relación entre el periodo y la profundidad es la siguiente.

$$H_s = 27.5(T_0 - 0.5)^{0.5}$$

Para el caso de la zona de estudio, se planteó también una relación potencial para obtener una relación potencial periodo-espesor, con la información de los 19 sondeos geotécnicos disponibles, así como el cálculo del periodo fundamental de estos puntos.

Al obtener la relación espesor-periodo de forma potencial, en la gráfica (Figura 29) se observa que la curva no ajustó a los puntos con periodos de 2.5 s a 3 s, que corresponden a los sondeos geotécnicos donde la capa de arcilla es más profunda que el resto. Por ello se buscó una relación que pudiera ajustarse a los sondeos más profundos. Para este trabajo se propuso

trabajar con una relación exponencial, la cual su gráfica si ajusta hasta los sondeos más profundos y con el periodo más alto (Figura 29).

Otro factor importante para tomar en cuenta la relación exponencial, es el valor del coeficiente de correlación(R), para el ajuste de la forma potencial, el valor fue de 0.9009. En cambio, para el ajuste de la forma exponencial fue de 0.9479. Debido a estos factores, se determinó a usar esta correlación para el mapa de espesores (Figura 30). Como resultado, la ecuación para la correlación se definió como:

$$H_s = 6.4302 * e^{0.7525*T}$$

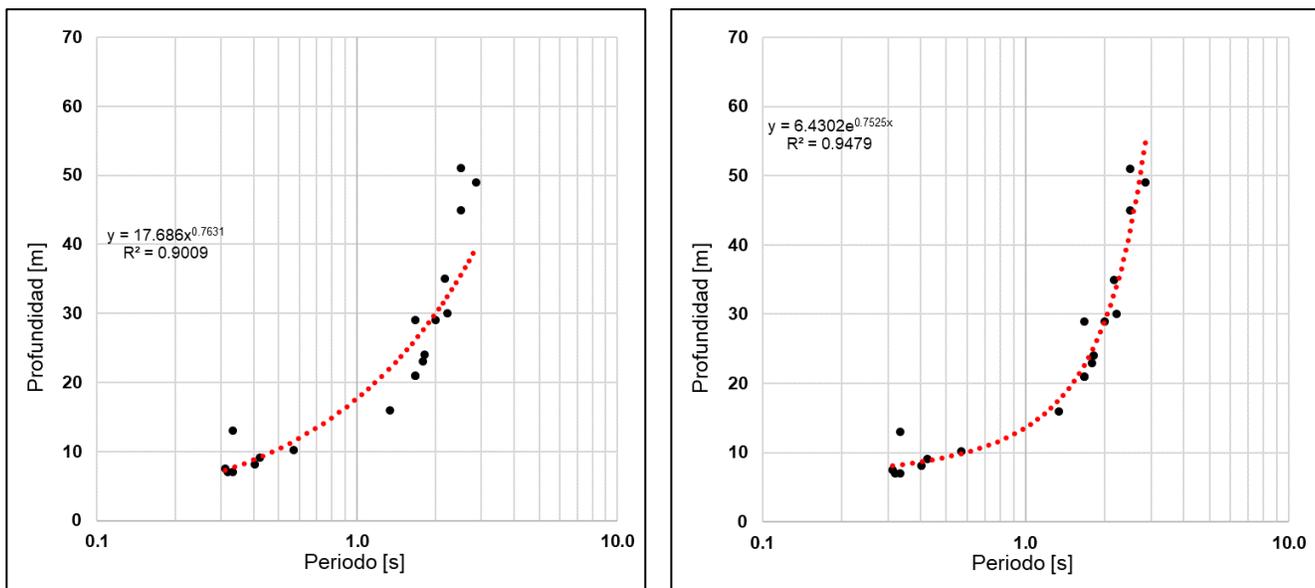


Figura 29. Relaciones periodo-espesor analizadas con los espesores de los puntos de medición sobre sondeos geotécnicos. A la izquierda, relación función potencial. A la derecha relación función exponencial.

La diferencia notable entre los mapas de espesores de la Figura 28 y 30 radica en las diferencias de estos. El valor mínimo de espesor del mapa realizado con la inversión HVInv® fue de 5 m, correspondiente a los puntos XO66, XO69 y ZA-01. Los valores de profundidad antes a la unidad brecha basáltica para estos puntos en el mapa de espesores con la relación exponencial son de 7 m para XO66 Y XO69 y 9 m para ZA01.

El valor máximo de espesor para el mapa de inversiones es de 52.56 m correspondiente a la medición del sondeo S06, el valor de profundidad de este punto para el mapa de espesores con la relación exponencial es de 45 m. Estas estimaciones de los espesores (inversiones de H/V y relación exponencial), se pueden comparar con los valores reales de los sondeos en la zona de la carretera, donde el valor de profundidad de las unidades anteriores a la brecha basáltica (piedemonte o arcilla lacustre), tiene ligeras diferencias de espesores (Ver Tabla 3).

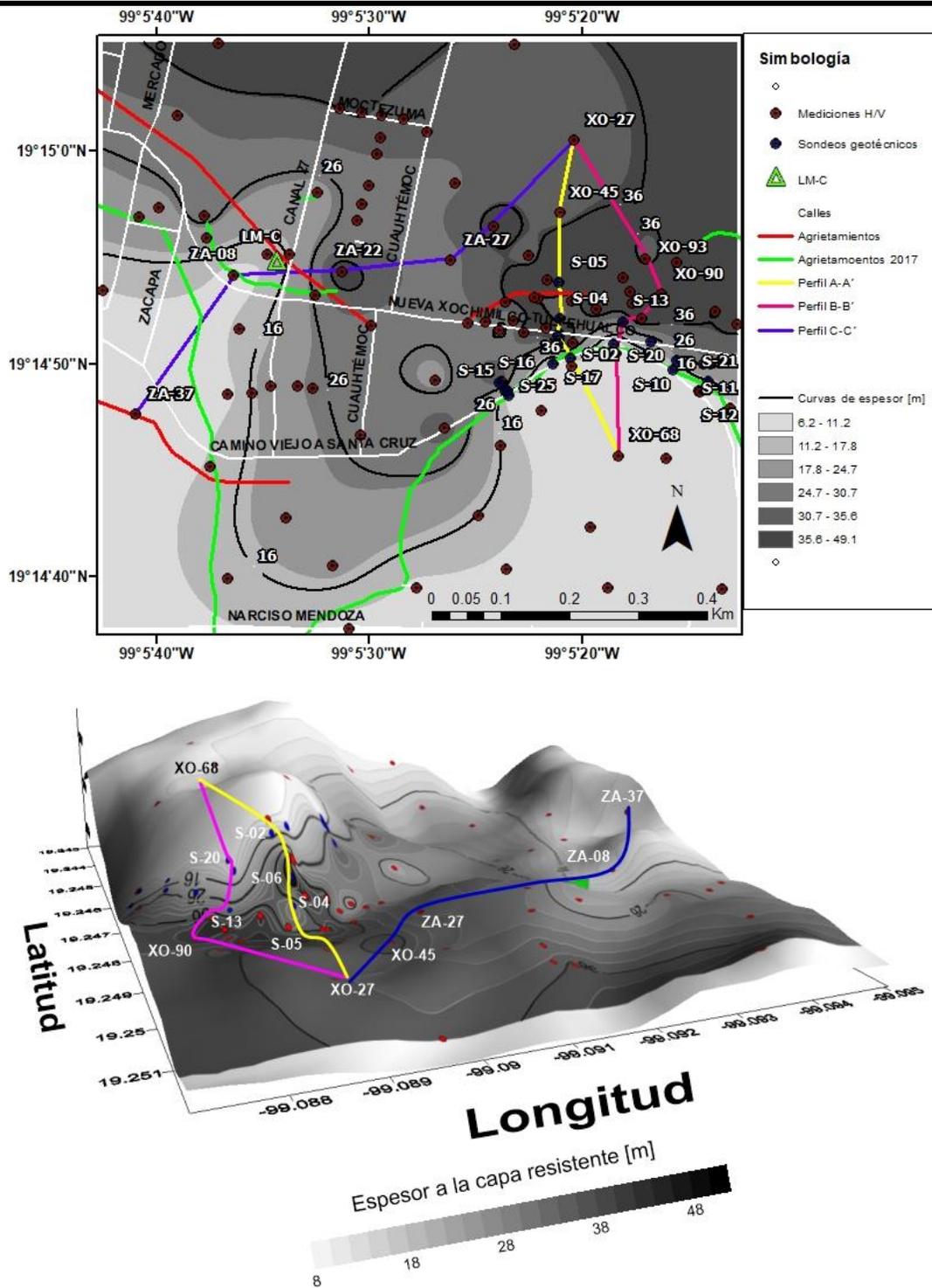


Figura 30. Mapa de espesores realizado con la relación exponencial de toda el área de estudio. Mapa superior vista en planta, Mapa inferior vista en 3-D. Líneas rojas y verdes corresponden a las grietas reportadas. Línea amarilla representa el perfil A-A'. Línea magenta representa al perfil B-B'. Finalmente, la línea azul representa el perfil C-C'.

Para el caso del mapa de espesores realizado con relación exponencial, el valor mínimo fue de 7 m, correspondiente a los puntos XO-66, XO-69, XO-72 y ZA-37. Para estos puntos de medición en el mapa de espesores realizado con el HVInv®, el valor fue de 5 m para XO-66 y XO-69, 5 m para XO-72 y 10 m para ZA-37. El valor máximo de espesor para el mapa de la relación exponencial fue de 52.59 m, que corresponde de nuevo al sondeo S-22. Este punto en el mapa de espesores respecto a las inversiones de H/V tuvo un valor de 46.12 m (Tabla 3).

Tabla 3. Comparativo de los valores de espesores de los sondeos geotécnicos de la carretera Xochimilco-Tulyehualco. Recordar que los valores de espesores fueron determinados por el contraste de impedancias entre la unidad de piedemonte y la unidad de arcilla lacustre contra la unidad brecha basáltica.

Número de Sondeo	Espesor [m] (Geotecnia)	Espesor HV Inv [m]	Espesor (forma exponencial) [m]
S02	12.70	13.23	8.26
S04	29.0	30.34	22.54
S05	45.0	50.12	45.19
S06	51.0	52.56	45.19
S07	7.0	7.54	8.26
S08	23.5	25.5	24.65
S09	7.0	9.1	8.18
S10	23.0	27.3	25.26
S11	29.0	35.20	29.96
S12	9.3	7.67	8.85
S13	31.2	34.78	34.23
S14	8.0	10.21	8.71
S15	25.0	30.45	22.54
S16	35.0	35.78	33.01
S17	10.2	10.23	9.88
S20	7.5	7.40	8.13
S21	17.0	19.32	17.54
S22	49.2	46.12	52.59
S25	21.0	20.13	22.54

La diferencia de espesores también se puede visualizar si tomamos como referencia el restaurante Los Manantiales (LM-C), en el mapa de espesores realizado con el software HVInv®, se observa que está en la curva aproximadamente de los 18 m, este mismo punto en el mapa de la correlación exponencial está ubicado en la curva de 14 m de espesor. Para la parte Sur, tomando como referencia el punto ZA-23, en el mapa de las inversiones, el punto se ubicó en la curva de aproximadamente 27 m de espesor, para el mapa de la correlación el punto se localizó en la curva de los 20 m.

5.3 Mapa de velocidades de onda de corte (Vs).

Con el objetivo de determinar las velocidades de onda de corte para el área de estudio, se procedió a elaborar un mapa donde se observe los cambios de velocidades de corte para las diferentes zonas en donde hay variaciones de periodo y espesor. El mapa se elaboró con respecto al fórmula:

$$T = \frac{4 * H}{V_s}$$

Donde T, se refiere al periodo de vibración del suelo, H corresponde al espesor del suelo y Vs se refiere a la velocidad de onda de corte.

Con la relación exponencial obtenida, se calculó el espesor para cada medición. En el caso de los sondeos geotécnicos donde se contó con información geotécnica, se dejaron los valores reales de los espesores. Al igual que en los mapas de espesores, se tomó el contraste de impedancias entre la capa anterior de cada punto a la unidad de la brecha basáltica. Al realizar el despeje de la variable Vs, la fórmula queda:

$$V_s = \frac{4 * H}{T}$$

Para la parte del mapa donde se encuentra la carretera Xochimilco-Tulyehualco, las curvas de velocidades de onda de corte van de los 55 m/s a un máximo de 120 m/s. Si tomamos como referencia los sondeos geotécnicos del perfil A-A' (S-05, S-06, S-04 y S22) se puede observar que la curva de velocidades de corte varía para estos puntos de 65 a 73 m/s, en estos sondeos el contraste de impedancias que se tomó fue entre la unidad de arcilla y la brecha basáltica. Para este mismo perfil, el sondeo S-02, el valor de la curva de velocidad Vs se calculó en un intervalo de 100 a 120 m/s, y para este sondeo el contraste de impedancias es entre la unidad de piedemonte y la brecha basáltica (Figura 31).

Con base a lo anterior, se puede inferir que las curvas de velocidades de onda de corte Vs que van de los 50 a los 75 m/s, corresponden al contraste entre la unidad de arcilla y la brecha basáltica, y para las curvas de velocidades de onda de corte mayores a los 80 m/s, corresponden al contraste entre la unidad de piedemonte y la unidad basáltica.

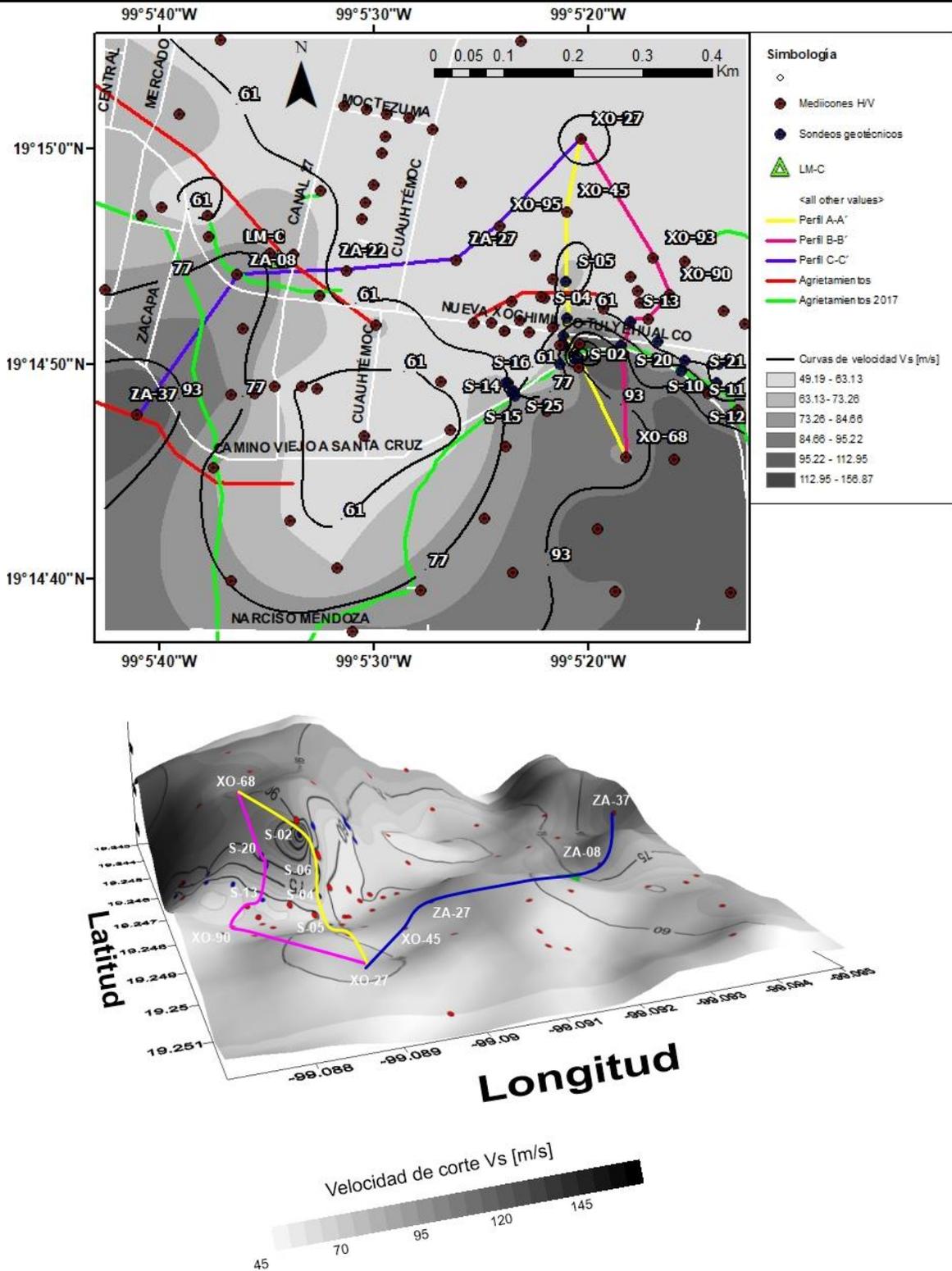


Figura 31. Mapa de velocidades de corte Vs. Mapa superior visto en planta, mapa inferior vista en 3-D. Las líneas rojas y verdes corresponden a las grietas reportadas. Línea amarilla representa el perfil A-A'. Línea magenta representa al perfil B-B'. Finalmente, la línea azul representa el perfil C-C'.

Para la parte del mapa donde se localizan los embarcaderos de Zacapa, las curvas de velocidades de onda de corte van de los 60 a los 100 m/s. Para esta parte de la zona de estudio, no se realizaron estudios geotécnicos, pero se comparó con respecto a la clasificación de las familias de los cocientes espectrales. Si tomamos como referencia el punto de medición ZA-22, este se ubica aproximadamente en la curva de los 60 m/s. Por su forma de onda, corresponde a la familia 6. En esta familia también se encuentra clasificado el punto de medición del sondeo geotécnico S-22. Para el punto de medición del restaurante Los Manantiales (LM-C), este se ubicó en la curva de velocidad de 73 m/s aproximadamente, de acuerdo a su forma espectral se clasificó en la familia 3, aunque para esta familia no se tiene información geotécnica, tanto las familias 3, 4, 5, 6 y el grupo nombrado anómalo, cuentan con la misma forma espectral y las inversiones realizadas para estos grupos de familias se usó el mismo parámetro de 4 capas y 1 semiespacio (Tabla 2). Para los puntos ZA-22 y LM-C, el contraste de impedancias fue entre la unidad de arcilla lacustre y la unidad de la brecha basáltica (Figura 31).

Lo anterior es similar para los puntos de medición ZA-08 (80 m/s) y ZA37 (100 m/s). De acuerdo a su forma de onda, el primer punto se clasificó en la familia 2, para este grupo se tienen los puntos de medición de los sondeos geotécnicos S-02, S-07, S-09, S-14 y S-20. Para el punto ZA-37 se clasificó en la familia 1, aunque para esta familia no se clasificó ningún cociente espectral correspondiente a algún sondeo geotécnico, las familias 1 y 2 cuentan con la misma forma espectral y las inversiones realizadas para ambas familias se usó el mismo parámetro de inversión, 2 capas y un semiespacio (Tabla 1). Para ambos puntos el contraste de impedancias fue entre la unidad de piedemonte y la unidad basáltica (Figura 31).

Con base a lo anterior se puede determinar que, las curvas de velocidades de onda de corte V_s que van de los 50 a los 75 m/s, corresponden al contraste entre la unidad de arcilla y la brecha basáltica, y para las curvas de velocidades de onda de corte mayores a los 80 m/s, corresponden al contraste entre la unidad de piedemonte y la unidad basáltica.

5.4 Comparativo entre los mapas de periodos, espesores y velocidades de corte (V_s).

Uno de los objetivos que se trazaron para este trabajo es la relación que puede existir entre los valores de periodos, espesores y velocidades de onda de corte. Esta correspondencia se puede visualizar tanto en las curvas espectrales de los puntos y en la información geotécnica. Conforme la curva tenga una frecuencia dominante a bajas frecuencias (periodo alto), el espesor de la unidad anterior a la unidad de brecha basáltica es más profunda que los puntos donde su curva espectral tiene una frecuencia dominante a altas frecuencias (periodos bajos). Estos contrastes también se pueden visualizar tanto en el mapa de periodos, espesores y velocidades de corte (V_s).

En la zona de los embarcaderos, al Oeste, se puede distinguir un probable derrame basáltico existente de la sierra del Chichinutzin, donde el espesor máximo de esta zona es aproximadamente de 11 m, el valor de periodo de esta área en específico es aproximadamente de 0.6 s. Este resultado también es comparable con los perfiles 1-D de espesores de las Figuras

19 y 20 correspondientes a la Familia 1 y 2, donde la primera capa tiene un máximo de 13 m, antes de llegar a la capa de la brecha basáltica de la Sierra de Chichinautzin.

Los intervalos de las curvas de velocidad de corte (V_s), oscilan entre los 80 a 100 m/s, donde la unidad de Piedemonte hace el contraste de impedancia con la unidad de brecha basáltica. Estos ya anteriormente definidos tanto por la información geotécnica y la clasificación de las familias H/V.

Caso similar se nota para el mapa de periodos en la zona de la carretera y los mapas de espesores, donde los valores en la zona de loma (0 s-0.6 s) son menores a los 10 m, y con valores de velocidades de corte entre los 80 a 130 m/s, antes de llegar a la unidad de la brecha basáltica proveniente de la Sierra del Chichinautzin.

Para la zona establecida como transición, tomemos de base el restaurante Los manantiales (LM-C); en el mapa de periodo, el restaurante se encuentra entre el intervalo de 0.6 s y 1 s. En los mapas de espesores, el restaurante se encuentra entre el intervalo de 18 a 24 m de espesor, antes de llegar a la brecha basáltica. Este resultado también es comparable con los perfiles 1-D de espesores correspondientes a la Familia 3, donde las primeras capas tienen un máximo de 23 m, antes de llegar a la capa de la brecha basáltica de la Sierra de Chichinautzin. Respecto a las curvas de velocidades de corte, oscilan entre los 70 a 75 m/s, donde la unidad de arcilla lacustre hace el contraste de impedancia con la unidad de brecha basáltica.

Para el caso de la carretera Xochimilco-Tulyehualco, los espesores varían de 10 m a 20 m, antes de llegar a la brecha basáltica con un intervalo de periodos entre 0.6 s a 1 s y un intervalo de velocidades entre 70 a 75 m/s, pero a diferencia de la zona de los embarcaderos de Zacapa, este cambio de espesores y periodos varía en un tramo muy corto.

Los periodos que son mayores a 1 s, se clasificaron como zona de lago, y corresponden a los espesores más profundos. Para el caso de la zona de los embarcaderos, el intervalo de periodos mayores a 1 s, varía de los 26 m a los 40 m de espesor. Esto es comprobable con los perfiles 1D de velocidades de las familias 4, 5 y 6, donde los espesores de la tercera capa correspondiente a la unidad de la arcilla esta entre los 25 a los 35 m. Las curvas de velocidades de corte varían de 55 a 70 m/s, donde la unidad de arcilla hace el contraste de impedancia con la unidad de brecha basáltica.

Para la carretera Xochimilco, se puede observar el mismo comportamiento, el intervalo de los periodos mayores a 1s presentan los espesores más profundos. Cabe destacar que, en la carretera, se presentan 3 zonas donde están los periodos más altos y corresponden a los puntos donde el espesor de la capa de la unidad anterior al basalto es más profundo, algunas de estas zonas corresponden a los sondeos geotécnicos S04, S06 y S22 marcados sobre el perfil A-A', y los espesores de arcilla para estas mediciones correspondientes a los sondeos geotécnicos varían entre 24 m a los 48 m. Y para estos puntos más profundos, los valores en el mapa de velocidades se encuentran en el intervalo de las curvas de entre 65 m/s a 73 m/s.

La grieta reportada para el sismo del 19 de septiembre de 2017, sigue la tendencia entre la zona de transición y la zona de lago. Esto se muestra el mapa de periodos de la zona de la carretera; la grieta va de los valores de 0.6 s a 1 s, donde justamente los espesores varían

abruptamente entre los 10 m a 20 m. Para el mapa de periodos del embarcadero, la grieta se ubica ente los valores de 0.5s y 1s, donde esa zona tiene una variación de espesores de 13 m a los 25 m aproximadamente.

También se debe observar que para la parte de la carretera Xochimilco-Tulyehualco, tanto los valores de periodos como los valores de espesores, varían de la zona de transición a la zona de lago en un tramo muy corto, se podría decir que la zona de transición para la carretera es casi inexistente, a diferencia de la parte de los embarcaderos de Zacapa, donde el tramo entre la zona de transición y zona de lago está más extenso. Con base en esto se hace mención que, el área del embarcadero de Zacapa, la zona de transición no es tan abrupta en comparación a la Carretera Xochimilco-Tulyehualco.

5.5 Perfiles estratigráficos a partir del mapa de espesores (Inversión HV Inv).

Con los espesores de la capa de algunos puntos de medición de ruido sísmico ambiental seleccionados, se realizaron tres perfiles con respecto a los resultados obtenidos con la inversión. El perfil A-A' tiene dirección N-S. Este primer perfil se realizó en la zona de la carretera Xochimilco-Tulyehualco, y esto con la finalidad de observar las variaciones en los espesores de las arcillas en la zona de estudio (Figura 32)

El perfil A-A' inicia desde la parte Sur de la zona de estudio, pasa por los puntos propuestos de medición XO-60, por los sondeos geotécnicos S-04, S-05 y S-06 y finalmente para la parte Norte pasa por los puntos XO-45, XO-27. El perfil tiene una longitud mayor a 400 m.

Las grietas reportadas posteriores al sismo del 19 de septiembre de 2017 se ubican justamente donde hay un gran cambio de espesores de arcillas, una se encuentra entre los sondeos S-02 y S-06, donde el espesor de arcilla llega aproximadamente a 45 m. La otra grieta se encuentra entre los sondeos S-04 y el sondeo S-05, donde hay una diferencia de espesor de 15 m de profundidad.

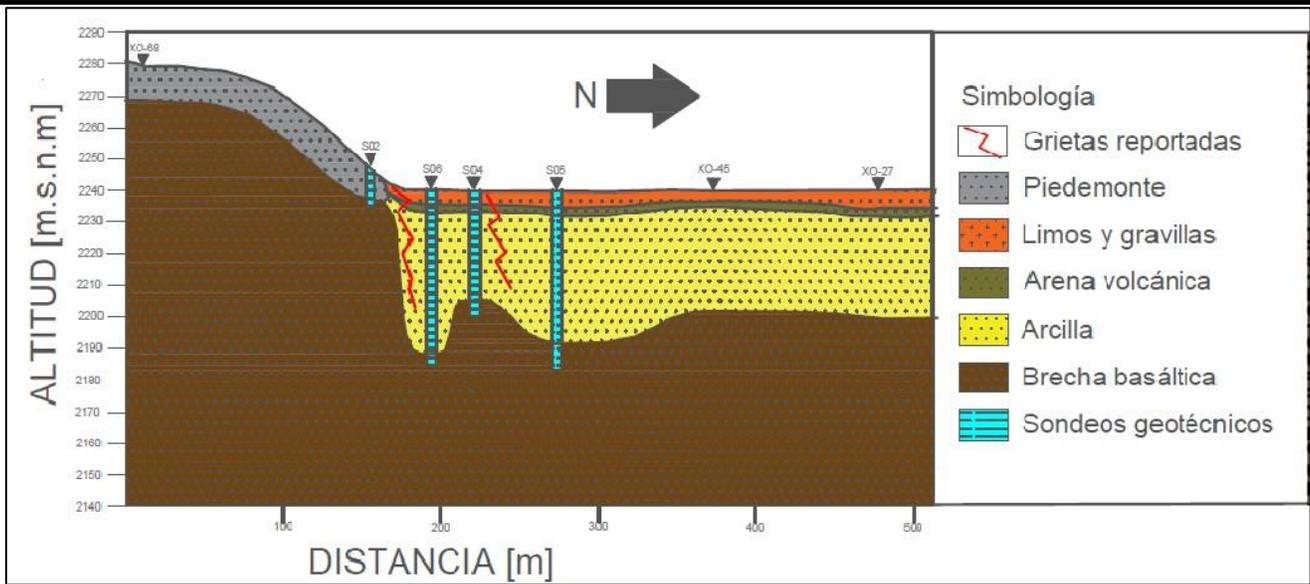


Figura 32. Perfil geológico A-A' obtenido con la inversión de las curvas H/V.

El contraste de espesores de la capa de arcilla y la brecha basáltica se observa en el pico con más amplitud en las curvas de H/V donde la frecuencia varía entre 0.4 a 0.6 Hz. (Figura 33).

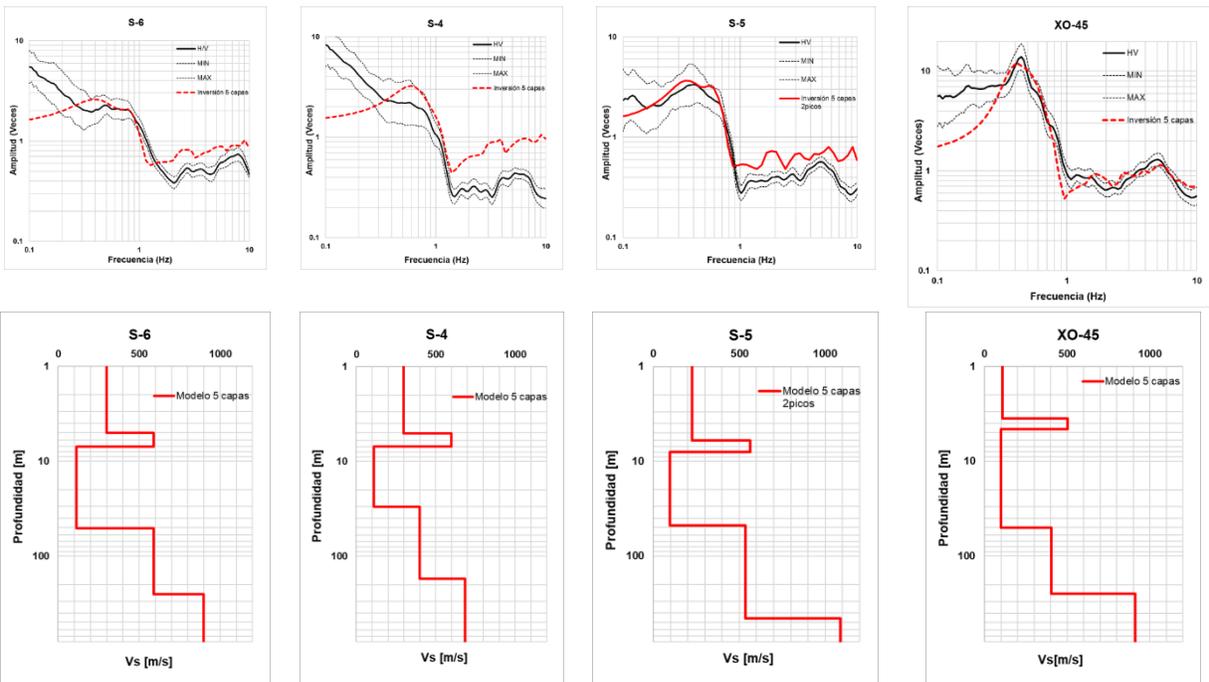


Figura 33. Imagen donde se muestra en la parte superior las curvas HV y en línea sesgada color rojo, la inversión realizada para los puntos S6, S4, S5 y XO-45. En la parte inferior se observa la profundidad calculada de cada punto.

Para los puntos de medición XO27 y XO45, se calculó un espesor entre 38 y 40 m, antes de llegar a la unidad de brecha basáltica, para ambos puntos el valor de le frecuencia fue de 0.45

Hz (2.2 s). Para los sondeos S06 y S05, se calculó el espesor de la arcilla entre 47 y 51 m, para estos puntos la frecuencia de ambas mediciones fue de 0.40 Hz (periodo de 2.5 s). Y estos puntos corresponden a la familia 5. Finalmente, el sondeo geotécnico S04, el valor de su espesor es de 30 m y el valor de la frecuencia fue de 0.6 Hz (1.67 s).

Si se hace una comparación entre los sondeos geotécnicos de la Figura 34 (Lermo et al., 2019), y con el perfil obtenido se aprecia que, el límite de la capa de arcilla con la brecha en el sondeo S-04, está aproximadamente a los 29 m, con la inversión se calculó que está a 30.34 m de profundidad. Para el punto S06, el sondeo llegó a la brecha basáltica a los 51 m, con la inversión se calculó que se llega a los 52.56 m de profundidad. Para el punto S-05, el sondeo geotécnico llegó a la brecha a 45 m de profundidad, con la inversión se calculó que la brecha está a 50.12 m de profundidad.

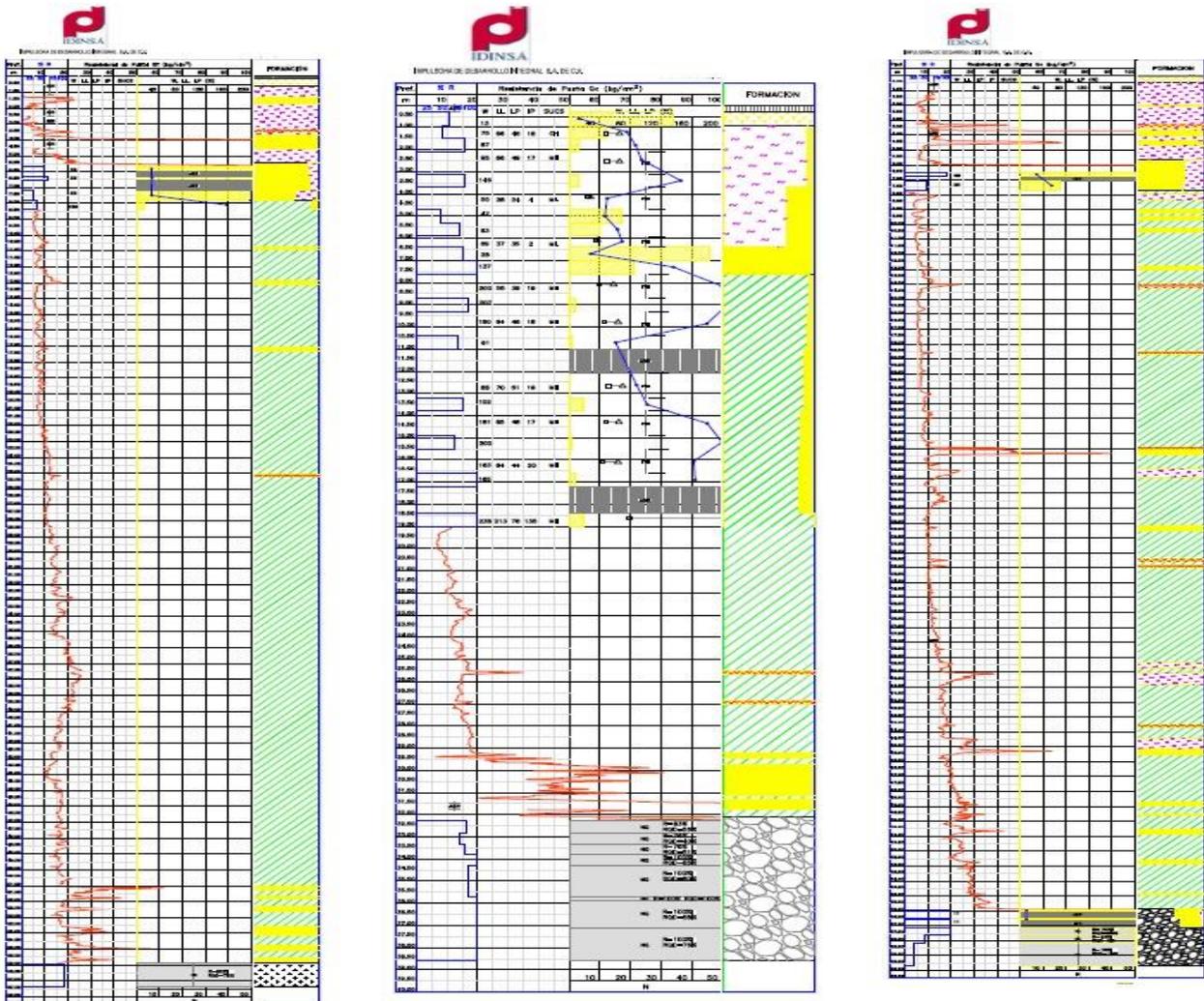


Figura 34. Sondeos geotécnicos de la zona Norte del perfil realizado. A la izquierda el sondeo S-06, al centro el sondeo S-04, y a la derecha el sondeo S05. (Lermo et al., 2019)

El segundo perfil B-B' inicia desde la parte Sur de la zona de la carretera, pasa por los puntos propuestos de medición XO-68, por los sondeos geotécnicos S-20 y S-13 y finalmente para la parte Norte pasa por los puntos XO-94, XO-90, XO-93 y XO-27. El perfil tiene una longitud mayor a 500 m (Figura 35). Las grietas reportadas posteriores al sismo del 19 de septiembre de 2017 se ubican justamente donde hay un cambio de unidad estratigráfica, esto se visualiza en el sondeo S-20, donde la unidad estratigráfica antes de la brecha basáltica es la unidad de piedemonte con un espesor de 7 m, posteriormente se encuentra el sondeo S-13, donde la unidad estratigráfica antes de la brecha basáltica es la arcilla con un espesor de 30 m.

El contraste de espesores de la capa de arcilla y la brecha basáltica se observa en el pico con más amplitud en las curvas de H/V donde la frecuencia varía entre 0.4 a 0.45 Hz. (Figura 36). Para los puntos de medición XO27, XO-93 y el sondeo geotécnico S-13, se calculó un espesor entre 36 y 40 m, antes de llegar a la unidad de brecha basáltica, para ambos puntos el valor de la frecuencia fue de 0.45 Hz (2.2 s). Para los puntos de medición XO-90 y XO-94, se calculó el espesor de la arcilla entre 45 y 47 m, para estos puntos la frecuencia de ambas mediciones fue de 0.40 Hz (periodo de 2.5 s).

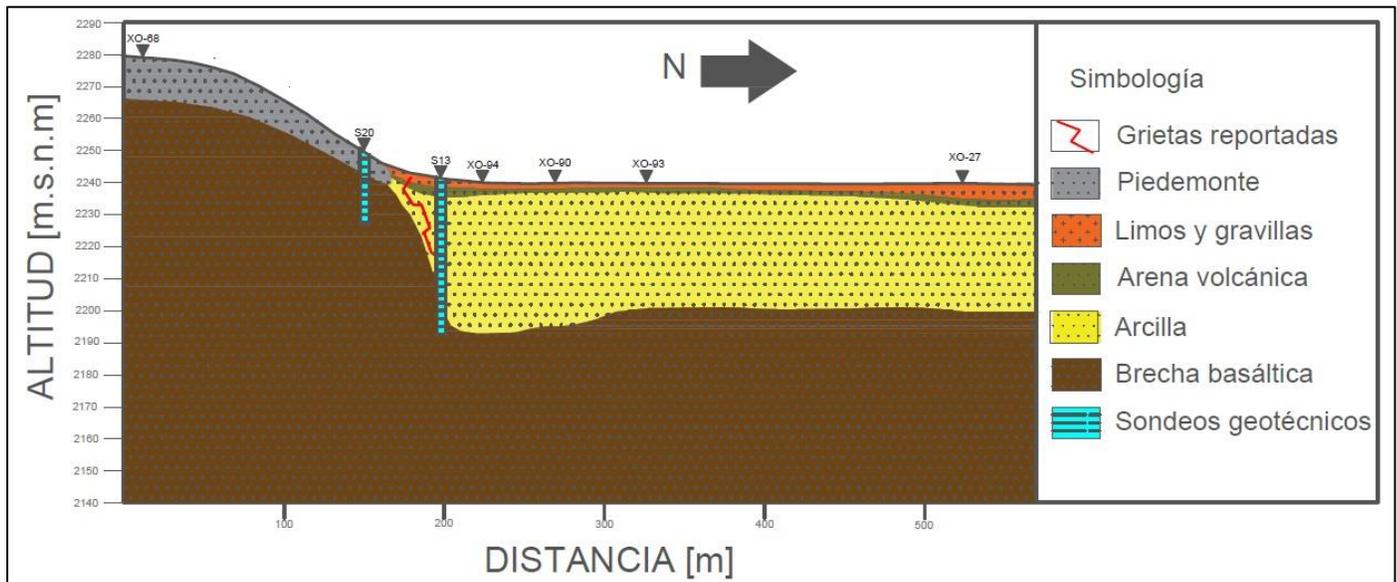


Figura 35. Perfil estratigráfico B-B' obtenido con la inversión de curvas H/V.

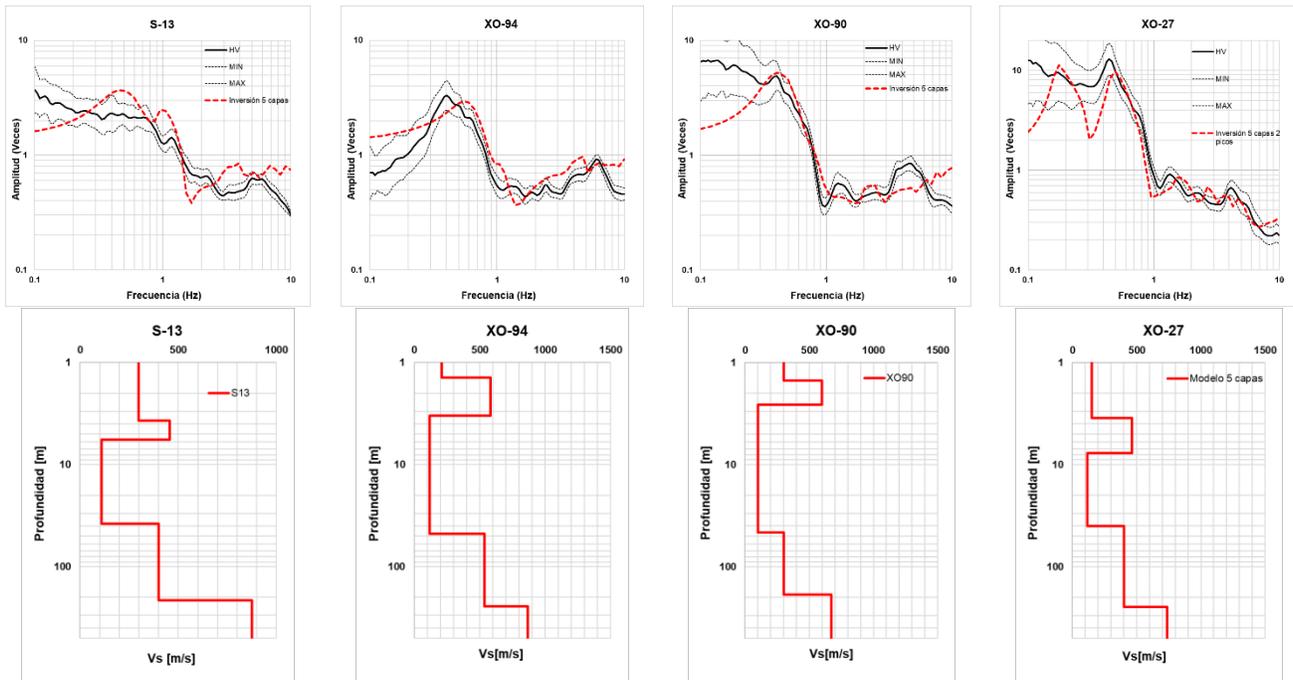


Figura 36. Imagen donde se muestra en la parte superior las curvas HV y en línea sesgada color rojo, la inversión realizada para los puntos S13, XO-90, XO-94 y XO-27. En la parte inferior se observa la profundidad calculada de cada punto.

Si se hace una comparación entre los sondeos geotécnicos analizados por *Lermo et al., 2019*, y con el perfil obtenido se aprecia que, el límite de la capa de arcilla con la brecha en el sondeo S-13, está aproximadamente a los 31.2 m, con la inversión se calculó que está a 34.78 m de profundidad. Para el punto S-20, el sondeo llegó a la brecha basáltica a los 7.5 m, con la inversión se calculó que se llega a los 7.4 m de profundidad (Ver Tabla 3).

EL tercer perfil C-C' inicia de la parte Oeste de la zona de estudio, inicia en el punto de medición ZA-37, ZA-08, ZA-22 ZA-27, XO95 y finaliza en el punto XO-27, tiene una longitud aproximada de 700 m (Figura 37). Las grietas reportadas posteriores al sismo del 19 de septiembre de 2017 se ubican justamente donde hay un cambio de unidad estratigráfica, esto se visualiza en el punto ZA-08, donde la unidad estratigráfica antes de la brecha basáltica es la unidad de piedemonte con un espesor de 10 m, posteriormente se encuentra el punto ZA-22, donde la unidad estratigráfica antes de la brecha basáltica es la arcilla lacustre con un espesor de 39 m.

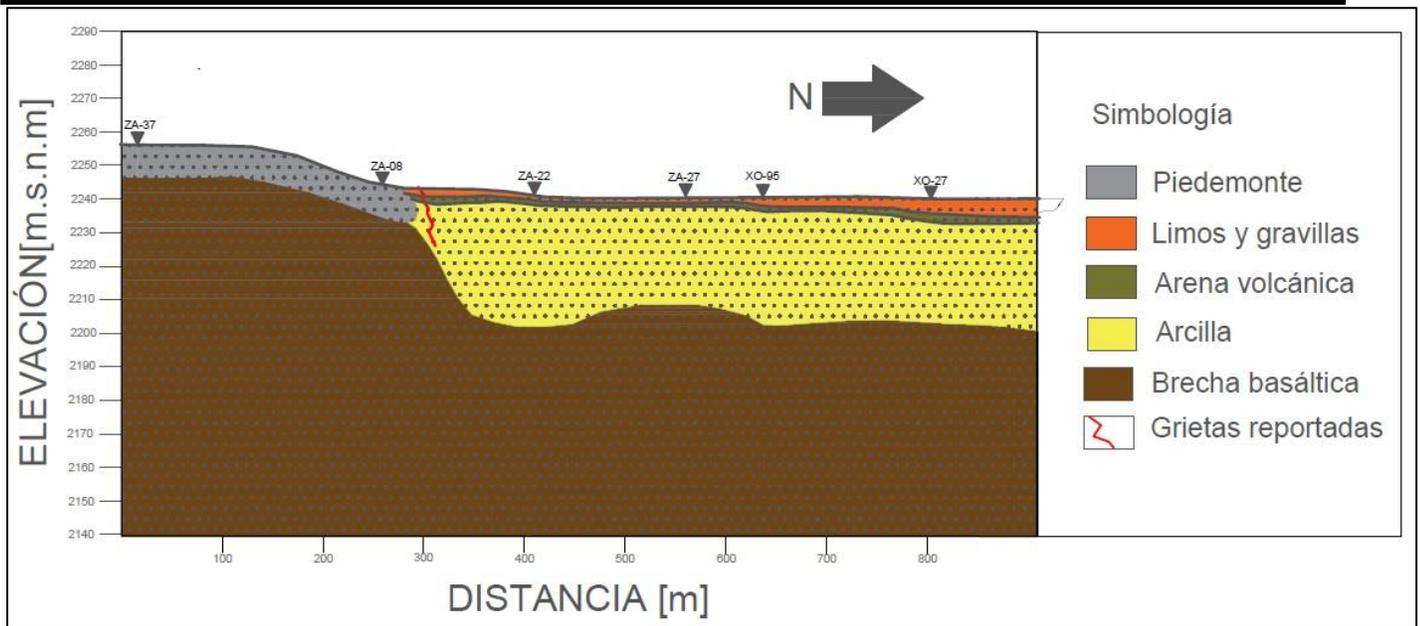


Figura 37. Perfil geológico C-C' obtenido con la inversión de las curvas H/V.

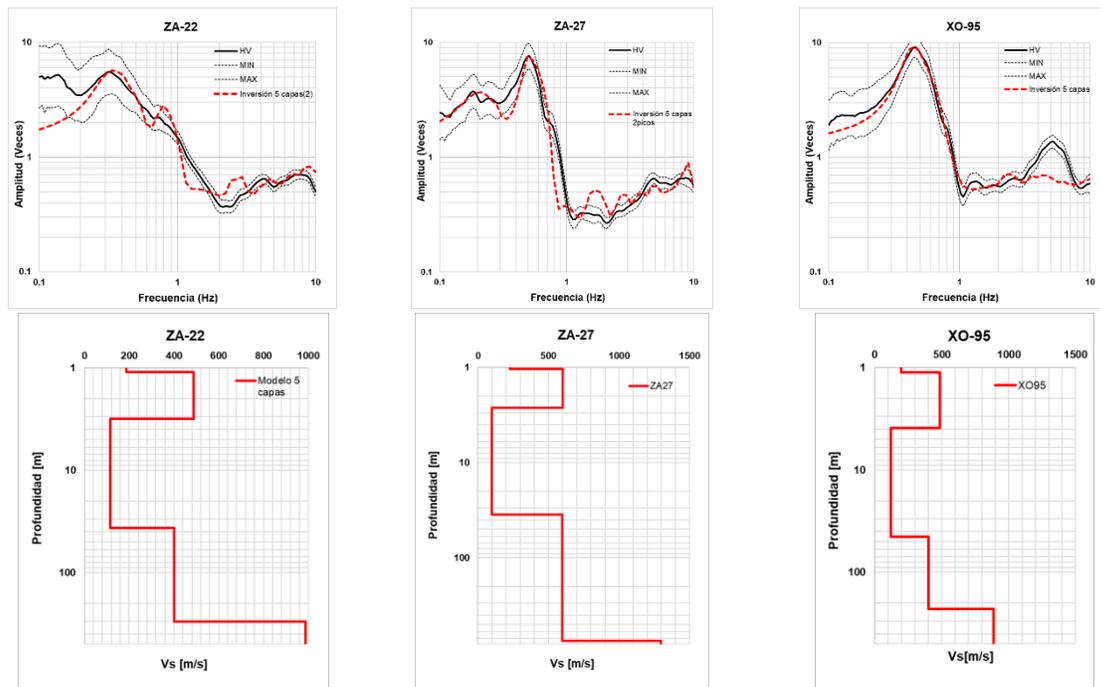


Figura 38. Imagen donde se muestra en la parte superior las curvas HV y en línea sesgada color rojo, la inversión realizada para los puntos ZA-22, ZA-27 y XO-95. En la parte inferior se observa la profundidad calculada de cada punto.

Para los puntos de medición ZA-22 y XO-95 se calcularon los espesores entre 39 y 40 m, antes de llegar a la unidad de brecha basáltica, y la frecuencia fue de 0.4 Hz (2.5 s). Para el punto XO-27 se calculó el espesor de 38 m antes de llegar a la brecha basáltica, y la frecuencia fue

de 0.45 Hz (2.2 s). Y finalmente para los para el punto de medición ZA-27 se calculó el espesor de la arcilla de 32 m, para este punto la frecuencia de la medición fue de 0.5 Hz (periodo de 2 s). Ver Figura 38.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de la interpretación geológica del sitio y de los perfiles geotécnicos, del análisis del ruido sísmico ambiental para obtener el cociente espectral H/V, de la inversión de la curva H/V para obtener las velocidades de corte, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los cambios abruptos en la estratigrafía, los cuales se observan en los perfiles geotécnicos, se deben a las diferentes coladas o derrames basálticos provenientes de la Sierra de Chichinautzin y cómo estos fluyen por la topografía del lugar cuando se depositan, y no son consecuencia de una falla presente en el lugar como se menciona en la interpretación de los sondeos geotécnicos y en el estudio de SACMEX (2016).
- Los valores de periodos en la zona de la carretera Xochimilco-Tulyehualco, muestran una transición abrupta justo en la zona de agrietamiento sobre la carretera, pasando de valores menores a 0.6 s (zona de loma), en la zona sur, a valores mayores a 1.0 s (zona de lago), en la parte norte. La zona de transición es casi inexistente. El mayor cambio de periodos se ubica en la zona oeste (casa del adulto mayor) en donde en un tramo menor a 50 m el periodo varía de 0.6 a 1.1 s. A su vez, podemos observar en el mapa de espesores que esta zona de transición abrupta es casi inexistente al existir cambio de espesores de 15 m a 28 m en un tramo muy pequeño, justamente donde se localizan los agrietamientos generados a partir del sismo del 19 de septiembre de 2017.
- Para la zona del embarcadero de Zacapa, los valores de periodos muestran un derrame basáltico lateral desde el Oeste con dirección hacia el restaurante Los manantiales, probablemente parte de la Sierra del Chichinautzin. También se define una zona de transición más amplia en comparación con la zona de la carretera, para la parte central de la zona de Zacapa. Esto también se corrobora en el mapa de espesores donde el cambio de espesores de 18 m a 24 m, varía en un tramo más amplio a comparación de la carretera Xochimilco-Tulyehualco, donde precisamente el agrietamiento pasa por esta zona de transición. Los valores mayores a 1 s corresponden una clara zona de lago.
- Se elaboraron dos mapas de espesores con diferentes metodologías con el propósito de confirmar los espesores de las unidades estratigráficas anteriores a la brecha basáltica, así como poder delimitar la sierra del Chichinautzin. El primer mapa fue realizado con las inversiones de los cocientes espectrales H/V y el segundo se elaboró a partir de una relación exponencial entre el periodo y el espesor de los sondeos geotécnicos. La única

diferencia de ambos métodos fue con respecto al espesor de la capa de piedemonte y arcilla, ambas son anteriores a la unidad de brecha basáltica. Con base a lo anterior se puede concluir que ambos métodos funcionan, pero para diferentes circunstancias. Si se cuenta con información a priori, como información geotécnica, se puede establecer una relación entre periodo y espesores y posteriormente corroborar con el método de las inversiones de los cocientes espectrales. Si no es el caso, se pueden realizar las inversiones, pero con los métodos de inversión globales que ofrecen el software HV Inv®.

- En el caso del mapa de periodos y los mapas de espesores, así como los perfiles estratigráficos, se puede notar que hay una relación directa con los espesores y las frecuencias (periodos) de las curvas H/V. en el primer perfil estratigráfico A-A', para los puntos XO-45, XO-27, la frecuencia de estas curvas fue de 0.45 Hz (2.2 s) y sus espesores calculados fueron entre 38 a 40 m, para los sondeos S-05 y S-06 su frecuencia fue de 0.45 Hz (2.5 s) y sus espesores varían entre 47 a 51 m y posteriormente en el sondeo S-04 su frecuencia fue de 0.6 Hz (1.67 s), donde hay una reducción en el espesor de la capa de arcilla aproximadamente de 20 m. Esto se puede corroborar en los sondeos elaborados por *Lermo et al, 2019*, (Figura 30) el sondeo S-04 se aproxima a los 32 m antes de la brecha. Para los sondeos geotécnicos S-05 y S-06 llegaron a la brecha basáltica a los 45 y 51 m respectivamente. Esta relación se observa en el perfil de la zona del embarcadero, el punto del restaurante Los manantiales LM-C, su frecuencia fue de 1.29 Hz (0.78 s) y su espesor se calculó en 20 m, posteriormente el punto MA-03 su frecuencia fue de 0.6 Hz (1.67 s) y su espesor calculado fue de 30 m y finalmente el punto ZA-13 el espesor se calculó de 38 m y su frecuencia fue de 0.45 Hz.
- La distribución de las velocidades de onda de corte (V_s) y de los espesores calculados por medio de la inversión de la curva H/V indican un gran cambio justo en la zona de la carretera. En la parte sur de la zona de estudio, en donde se ubican los derrames basálticos, las velocidades de onda S son mayores a los 200 m/s. Sin embargo, hacia el norte en donde se encuentra la arcilla lacustre, las velocidades de onda S varían de 90 a 120 m/s. Debajo de las arcillas, la velocidad de onda S varía de 400 a 1200 m/s. Por lo tanto, hay una variación de velocidades de onda de corte importante de forma lateral y horizontal de las arcillas lacustres con respecto a los derrames basálticos de la sierra de Chichinautzin.
- Con respecto a los valores de velocidad de onda de corte (V_s) calculados por medio de la relación de periodo y espesores, podemos observar que, para la parte sur de la zona de estudio las curvas de velocidades varían de 80 a 130 m/s, correspondientes al contraste de impedancias entre la unidad de piedemonte y la brecha basáltica, donde los espesores varían de 3 a 15 m. Esto se correlacionó con la información geotécnica de los sondeos y la agrupación de las familias 1 y 2, que corresponden a las mediciones H/V donde el contraste de impedancias está entre la unidad de piedemonte y la brecha basáltica, y las cuales cuentan con la misma forma espectral, con la diferencia del valor de la frecuencia fundamental (periodo dominante). Caso similar ocurre para la parte

central y norte de la zona de estudio, donde los valores de las curvas de velocidades de onda de corte varían entre los 50 a 70 m/s, correspondiente al contraste de impedancias entre la unidad de la arcilla y la brecha basáltica, donde la variación del espesor va de los 20 a 50 m de profundidad y están clasificadas en las familias 3, 4, 5, 6 y curvas anómalas, las cuales cuentan con la misma forma espectral pero a diferente frecuencia fundamental (periodo dominante).

- Considerando la variación del periodo de vibración del suelo, y las variaciones de espesores a lo largo de la zona de trabajo, se puede considerar que el agrietamiento se debe a la transición entre la zona de lomas y la zona de lago (mecanismo de generación de grietas Tipo II, ver sección 2.1), y a la consolidación súbita del suelo durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 por la diferencia de aceleraciones entre la zona de loma y la zona de lago. Además, por la interpretación geológica mencionada en este estudio, se considera que el agrietamiento no se debe a una falla geológica en el sitio como se menciona en los sondeos geotécnicos y en SACMEX (2016).
- Los resultados presentados en este informe dan una idea fidedigna de la geomorfología de las zonas estudiadas. Las inferencias se basan en técnicas geofísicas de campo, con las que se hicieron numerosas observaciones. Como estos modelos son de naturaleza 1D deben complementarse con la observación de los rasgos superficiales, desde el punto de vista de la geología estructural. Una tarea pendiente para estudios futuros será la estimación de las incertidumbres.
-

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, H. R., Galicia, M., Pérez-Rocha, L. E., Avilés, J., Vieitez, L., Salazar, M. 2003. *Efecto del hundimiento regional en las propiedades dinámicas del suelo*. Centro de Investigación Sísmica AC, México DF.
- Arai, H. & Tokimatsu, K., 2004. S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum, *Bull. seism. Soc. Am.*, **94**(1), 53–63.
- Arce, J.L., Layer, P.W., Macías, J.L., Morales-Casique, E., Gracia-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F.J., Benowitz, J., and Vásquez-Serrano, A. 2019. Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Maps*. Vol. 15, No. 2,320-332. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1593251>.
- Auvinet, G., Méndez, E., Juárez, M., Hernández, F., y Martínez, O. 2014. Avances sobre el agrietamiento del suelo asociado al hundimiento regional en el Valle de México. *Memorias de la XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica 2014*, Puerto Vallarta, México.
- Auvinet, G., Méndez, E., y Juárez, M. 2016. *El subsuelo de la Ciudad de México. Volumen III*.
- Avilés J., y Pérez-Rocha, L. E. (2010). Regional subsidence of Mexico City and its effects on seismic response. *Soil Dyn Earthquake Eng* **30**,981-989.
- Chávez-Segura, R. E., Tejero-Andrade, A., Cifuentes-Nava, G., Hernández-Quintero, E., García-Serrano, A., y Zamudio-Ángeles, D. 2017. *Estudio geofísico en el embarcadero de Zacapa, Delegación Xochimilco, CDMX*. Informe presentado para la Dirección de General de Emergencias Mayores de la Secretaría de Protección Civil de la Ciudad de México.
- Derode, A., Larose, E., Tanter, M., de Rosny, J., Tourin, A., Campillo, M. and Fink, M. (2003): Recovering the Green's function from field-field correlations in an open scattering medium (L). *J. Acoust. Soc. Am.*, 113(6): 2973-2976-
- Díaz-Rodríguez, J. A. 2006. Los suelos lacustres de la Ciudad de México. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 6(2) 129.
- García-Jerez, A., Piña-Flores, J., Sánchez-Sesma, FJ., Luzón, E., and Pertou, M., 2016. A computer code for forward computation and inversión of the H/V spectral ratio under the diffuse field assumption, *Comput. & Geosci.*, 97, 67-78.
- Ibs-von Seth, M., Wohlenberg, J., 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol 89, No. 1, pp 250-259.

Kawase, H., Sánchez-Sesma, F.J., y Matsushima, S., 2011: The optimal use of horizontal-to-vertical spectral ratios of earthquake motions for velocity inversions based on diffuse-field theory for plane waves. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 101(5), 2001-2014.

Kawase H., Mori Y y Nagashima, F. (2018) Difference of horizontal-to-vertical spectral ratios of observed earthquakes and microtremors and its application to S-wave velocity inversion based on the diffuse field concept *Earth, Planets and Space*. 70:1 <https://doi.org/10.1016/s40623-0170766-4>.

Kawase H, Nagashima F, Nakano K, y Mori Y (2019) Direct evaluation of S-wave amplification factors from microtremor H/V ratios: Double empirical corrections to “Nakamura” method, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 126 (2019) 105067. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.049>.

Larose E., Derode, A., Campillo, M. y Fink, M. 2004: *Imaging from one-bit correlations of wideband diffuse wave fields*. *Journal of applied physics*, 95(12):8393-8399, 2004.

Lermo, J., y Chávez-García, F. J. 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 83, No. 5, pp. 1574-1594.

Lermo, J., Chávez-García, F. J. 1994. Are microtremors useful in site response evaluation? *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 5, pp. 1350-1364.

Lermo, J., Mayoral, J. M., Ramos, E., Álvarez, I., Zúñiga, A., Machado, R., Luna, J., Jiménez, N., Téllez, N., 2018. *Asesoría técnica en aspectos geotécnicos y geo-sísmicos de la carretera vieja Xochimilco-Tulyehualco*. Reporte técnico.

Machado-González, O., Ramos, E., Álvarez, I., Zúñiga, A., Luna, J. (2019). Modelo geosísmico generado a partir de técnicas de sísmica pasiva (HVNR y Vs) para el análisis de grietas en un tramo de la carretera Xochimilco-Tulyehualco, CDMX. *Memorias del Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, SMIS 2019*. Monterrey, México.

Martínez-González, J. A. 2011. *Evaluación de las grietas de la Cuenca de México originadas por la morfología de la roca basal usando mediciones de microtremores*. Tesis de Licenciatura para obtener el Título de Ingeniero Geofísico, Facultad de Ingeniería, UNAM:

Parolai, S., Bormann, P., Milkereit, C. 2002. New relationships between Vs thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany). *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 92, No. 6, pp. 2521-2527.

Perton, M., Sánchez-Sesma, F.J., Rodríguez-Castellanos, A., Campillo, M. and Weaver, R.L. (2009): Two perspectives on equipartition in diffuse elastic fields in three dimensions. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 126, pp. 1125-1130.

Piña-Flores, J. 2015. *Cálculo e inversión del cociente H/V a partir del ruido ambiental*. Tesis de maestría para obtener el grado de Maestro en Ciencias. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.

Piña-Flores, J., Perton, M., García-Jerez, A., Carmona, E., Luzón, F., Molina-Villegas, J. C., y Sánchez-Sesma, F. J. 2017. The inversión of spectral ratio H/V in a layered system using the diffuse field assumption (DFA). *Geophysical Journal International*, 208, pp. 577-588.

SACMEX. 2016. *Estudio técnico geofísico sobre la avenida nueva Xochimilco-Tulyehualco, entre las calles Desiderio Peña y San Jerónimo en el pueblo de Santa María Nativitas, Delegación Xochimilco, México, D.F.* Reporte técnico.

Salinas, V, Luzón, A., García-Jeréz, A., Sánchez-Sesma, F.J., Kawase, H., Matsushima, S., Suarez, M., Cuellar, A., and Campillo, M. 2014: Using diffuse field theory to interpret the H/V spectral ratio from earthquake records in Cibeles seismic station, Mexico City. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 104(2), 995-1001.

Sánchez-Sesma, F.J., Pérez-Ruiz, J.A., Luzón, F., Campillo, M. and Rodríguez-Castellanos, A. 2008: Diffuse fields in dynamic elasticity, *Wave Motion*, Vol. 45, pp. 641-654.

Sánchez-Sesma, F.J., Perton, M. 2016. Green's function calculation from equipartition theorem, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 140, 1309.

Sánchez-Sesma, F.J., Rodríguez, M., Iturrarán-Viveros, U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin, L., García-Jerez, A., Suárez, M., Santoyo, M. A. and Rodríguez-Castellanos, A. 2001a: A theory of microtremor H/V spectral ratio: Application for layered médium. *Geophysical Journal International*, Vol. 186, pp 221-225.

SESAME. 2004. *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation*. European Research Project. SSN. 2017. *Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1)*. Reporte especial.

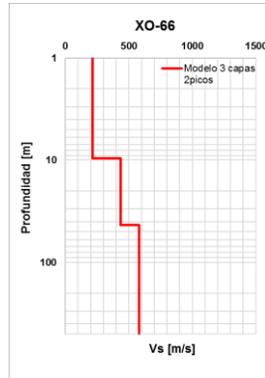
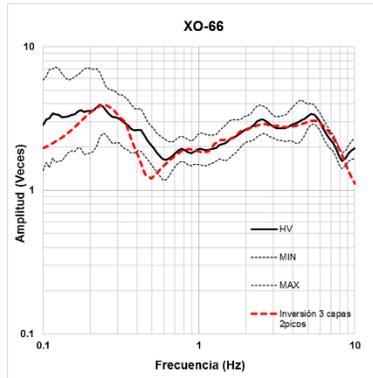
Weaver, R.L. 1982: On diffuse waves in solid media, *J. Acoustic. Soc. Am.*, Vol. 71., pp. 1608-1609

Weaver, R.L. 1985: Diffuse elastic waves at a free surface. *J. Acoustic. Soc. Am.*, Vol. 78, pp. 131-136

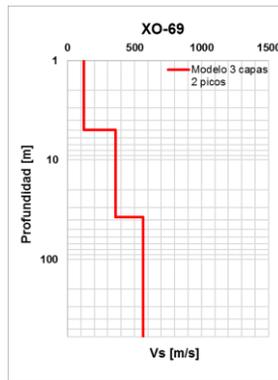
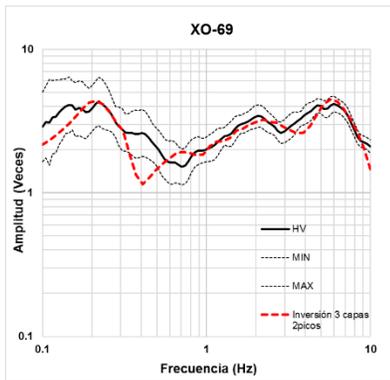
Weaver, R.L. 2010: Equipartition and retrieval of Green's function. *Earthq Sci.*, Vol. 23, pp. 397-402.

ANEXO A.

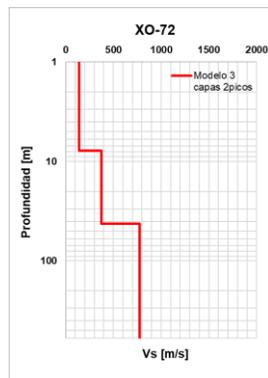
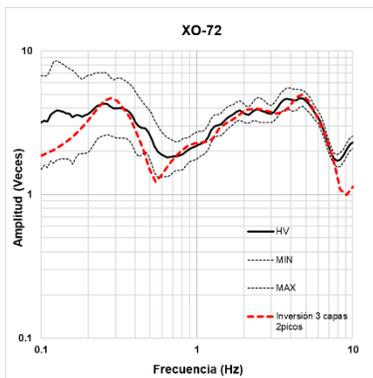
Cocientes espectrales HV y modelos de inversión de la familia 1



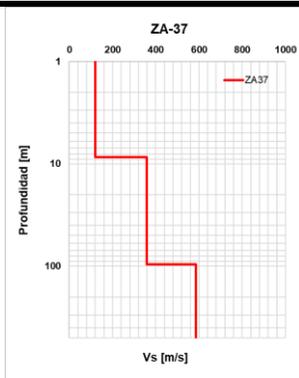
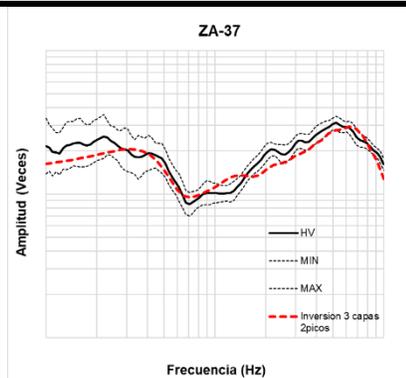
Modelo 3 capas XO-66		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	9.58	215.48
2	33.4	437.84
3	-	682.58



Modelo 3 capas XO-69		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	5	120.62
2	32.44	358.78
3	-	566.03

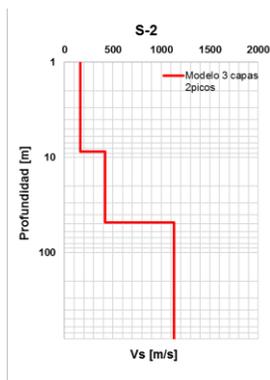
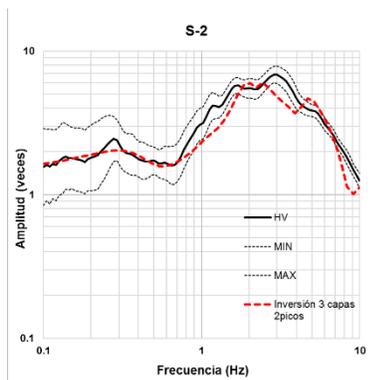


Modelo 3 capas XO-72		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	7.81	142.25
2	34.4	375.48
3	-	772.54

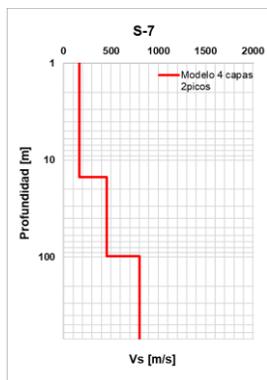
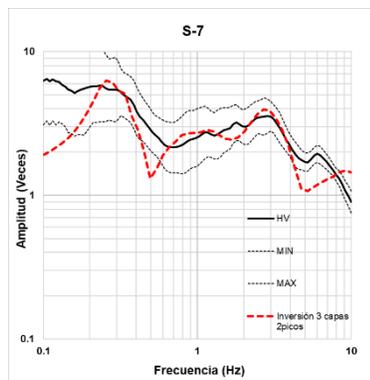


Modelo 3 capas ZA-37		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	8.64	120.62
2	87.04	358.78
3	-	586.76

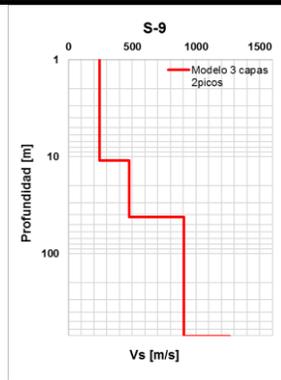
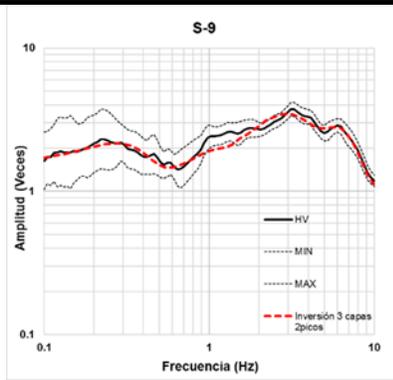
Cocientes espectrales HV y modelos de inversión de la familia 2



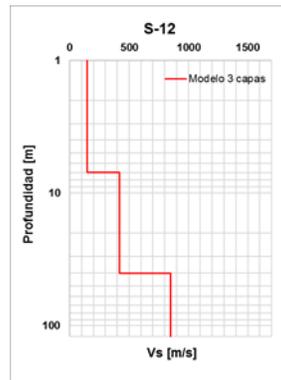
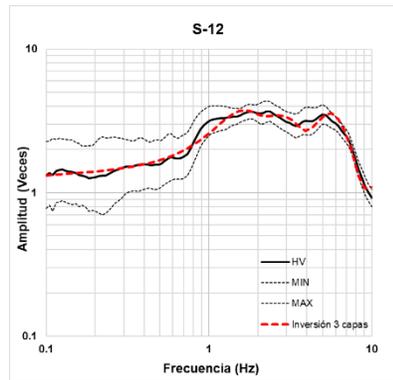
Modelo 3 capas S-02		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	11	161.7
2	39.76	417.62
3	-	1130.34



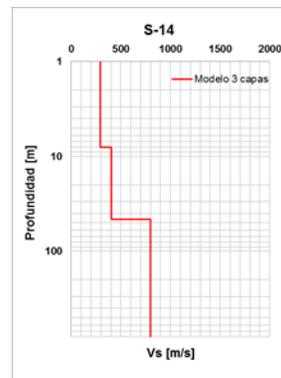
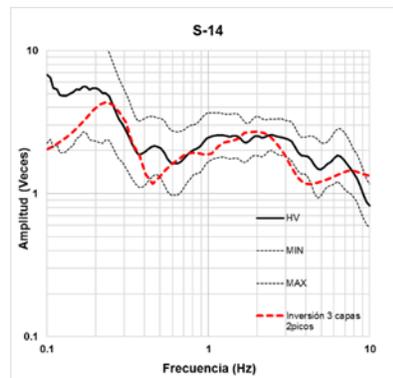
Modelo 3 capas S-07		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	11	165.43
2	82.5	453.92
3	-	801.66



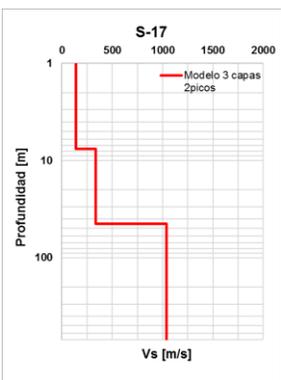
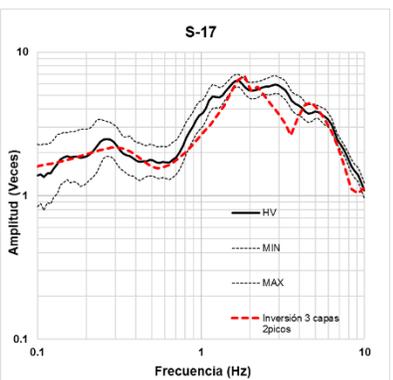
Modelo 3 capas S-09		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	10	245.76
2	31.07	476.88
3	-	905.64



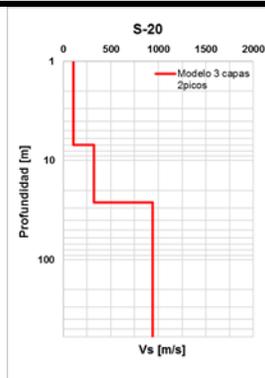
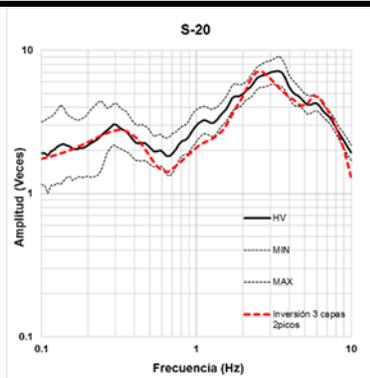
Modelo 3 capas S-12		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	7	148.65
2	33.39	417.11
3	100	848.4



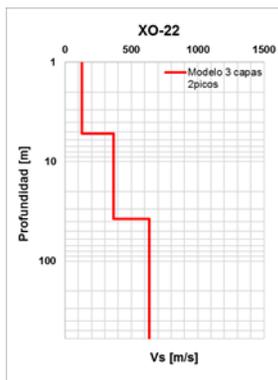
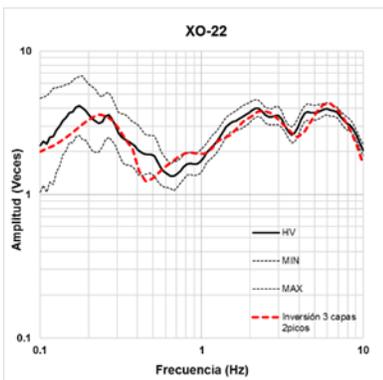
Modelo 3 capas S-14		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	8	294.89
2	43.14	403.59
3	-	800.11



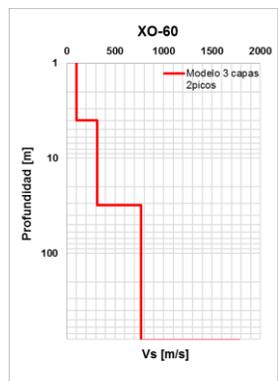
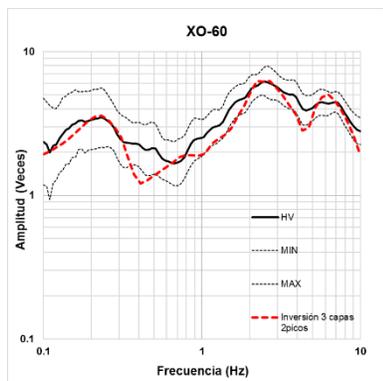
Modelo 3 capas S-17		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	8.57	139.34
2	36.98	336.08
3	-	1038.12



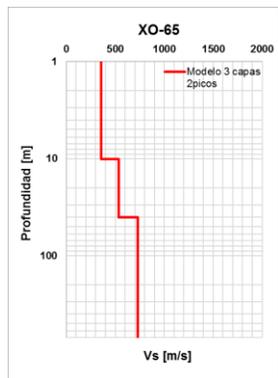
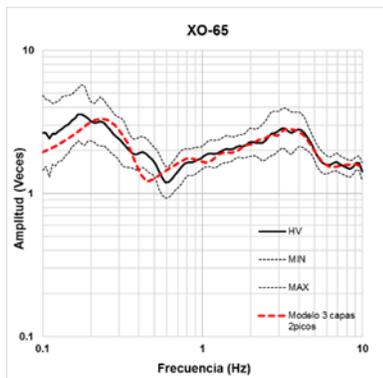
Modelo 3 capas S-20		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	7.57	107.58
2	24.93	322.10
3	-	938.16



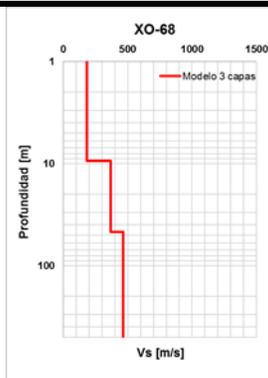
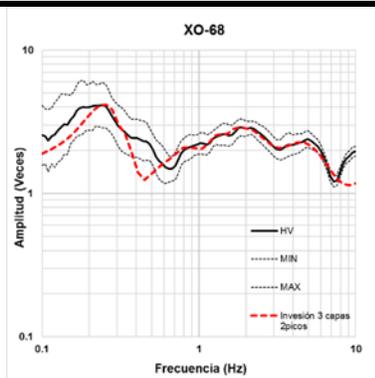
Modelo 3 capas XO-22		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	6.19	129.29
2	32.34	365.66
3	-	733.91



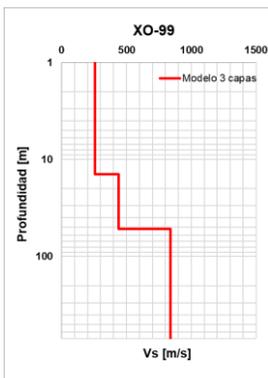
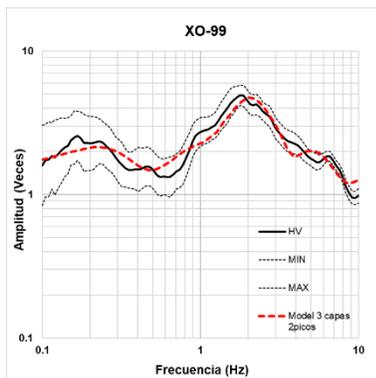
Modelo 3 capas XO-60		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	4.93	130.07
2	28.81	400.79
3	-	932.36



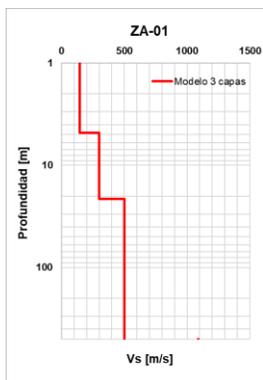
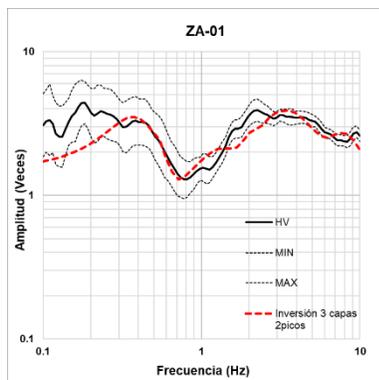
Modelo 3 capas XO-65		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	10	255.74
2	30.12	535.97
3	-	729.99



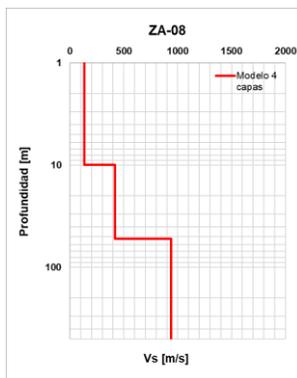
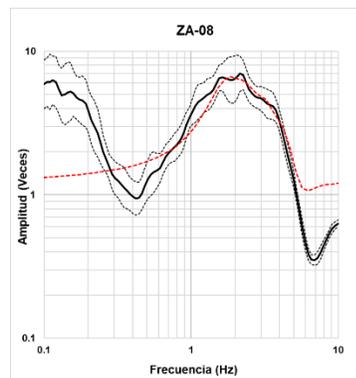
Modelo 3 capas XO-68		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	9.47	182.12
2	37.3	367.42
3	-	565.27



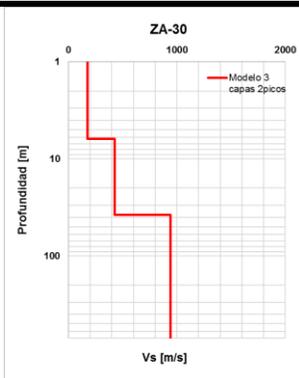
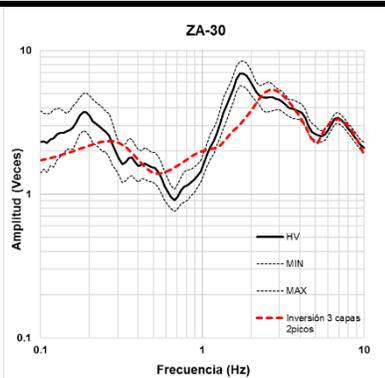
Modelo 3 capas XO-99		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	14.24	257
2	37.45	440.7
3	-	839.74



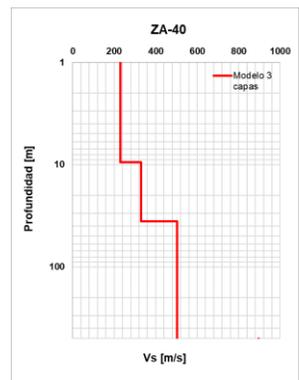
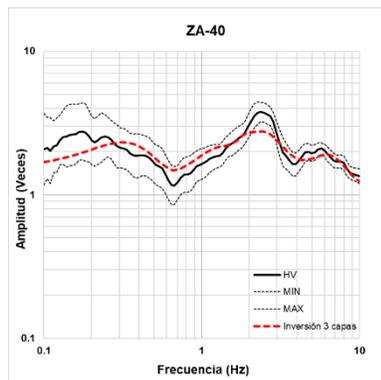
Modelo 3 capas ZA-01		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	4.8	144.57
2	16.61	300.05
3	-	500.26



Modelo 3 capas ZA-08		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	9.97	135.25
2	42.59	416.85
3	-	940.03

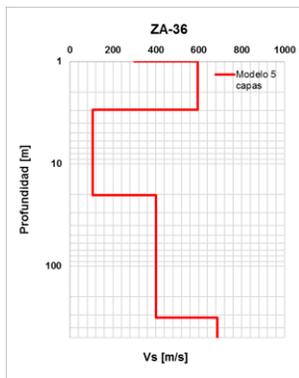
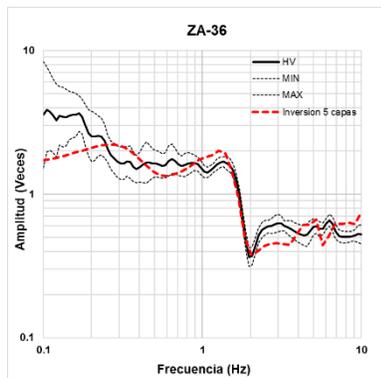


Modelo 3 capas ZA-30		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	6.21	175.42
2	31.64	427.5
3	-	940.49

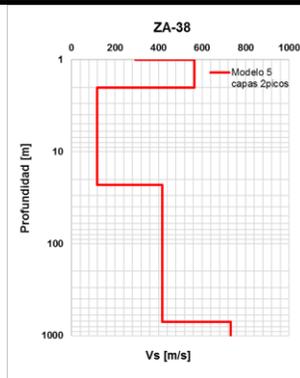
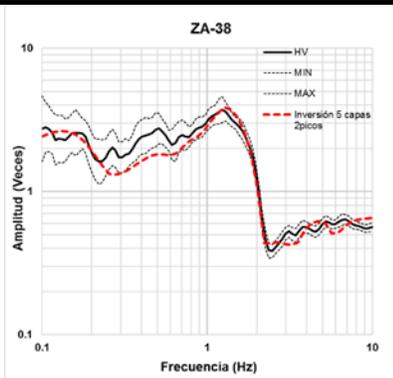


Modelo 3 capas ZA-40		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	9.46	219.68
2	26.35	330.24
3	-	940.49

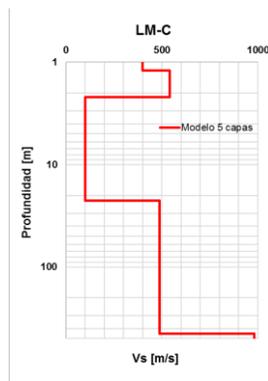
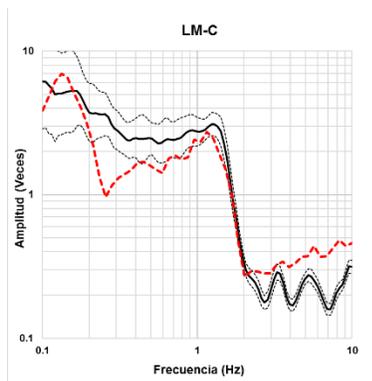
Cocientes espectrales HV y modelos de inversión de la familia 3



Modelo 5 capas ZA-36		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.0	289.64
2	1.98	546.15
3	17.20	106.3
4	300	400.48
5	-	686.51

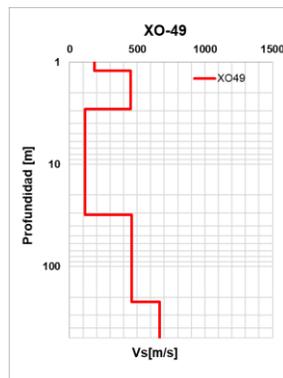
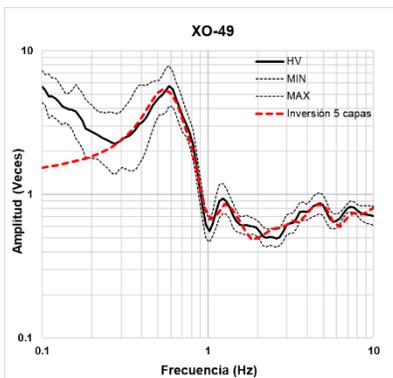


Modelo 5 capas ZA-38		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.0	293.97
2	1.0	545.91
3	20.88	117.3
4	684.55	417.14
5	-	732.13

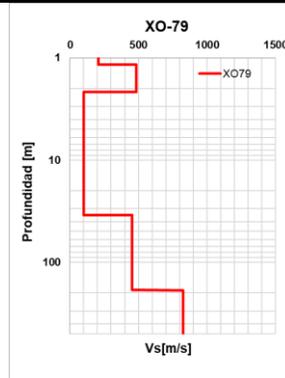
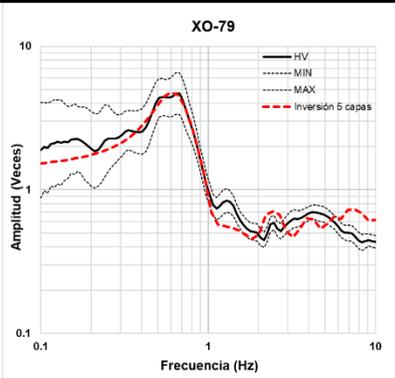


Modelo 5 capas LM-C		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.2	267.98
2	1.0	306.25
3	20.29	88.53
4	424.32	402.3
5	-	874.85

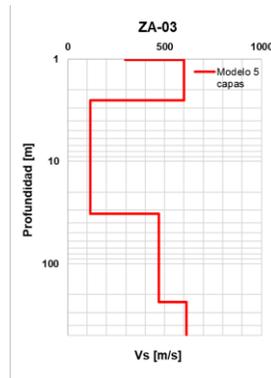
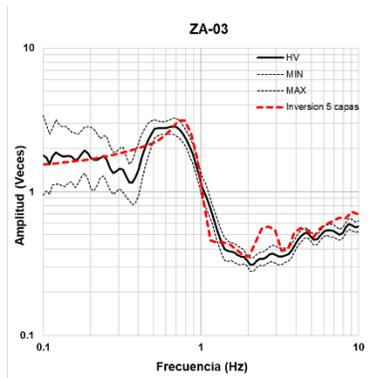
Cocientes espectrales HV y modelos de inversión de la familia 4



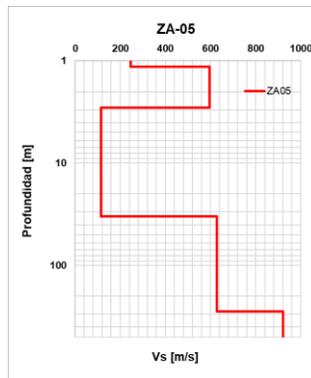
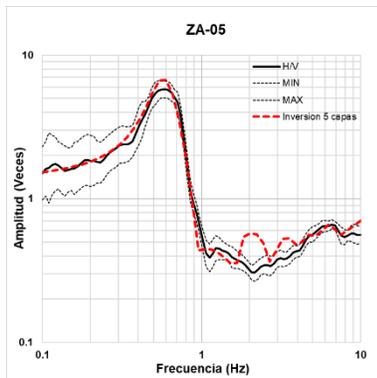
Modelo 5 capas XO-49		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.22	182.46
2	1.66	452.67
3	28.22	116.78
4	190.1	458.15
5	-	665.54



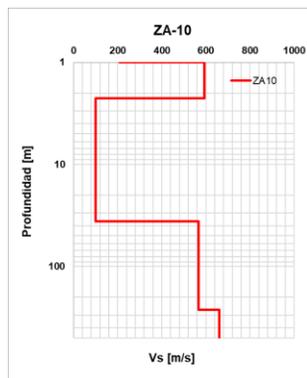
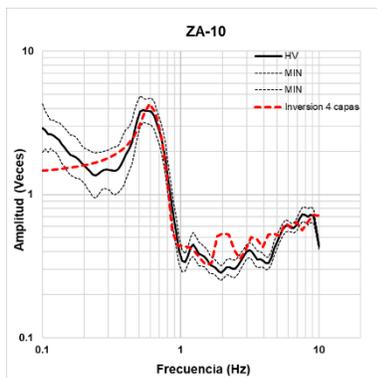
Modelo 5 capas XO-79		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.16	207.74
2	1.01	485.21
3	32.42	99.09
4	153.05	458.15
5	-	865.54



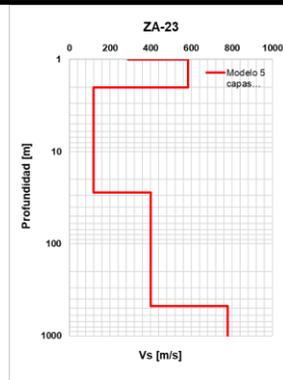
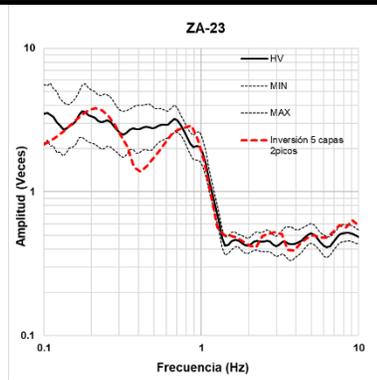
Modelo 5 capas ZA-03		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.02	287.74
2	1.51	589.05
3	29.87	112.05
4	204.76	468.15
5	-	615.54



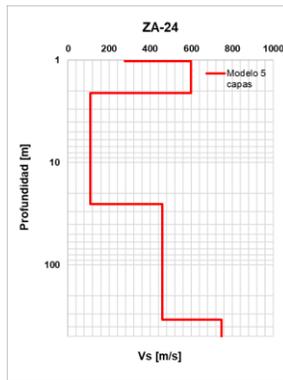
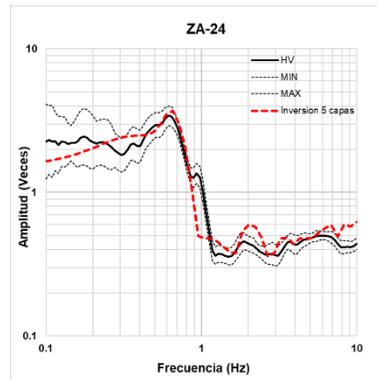
Modelo 5 capas ZA-05		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.14	247.74
2	1.73	589.05
3	30.26	112.05
4	248.74	628.15
5	-	925.54



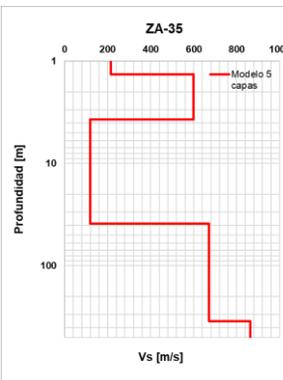
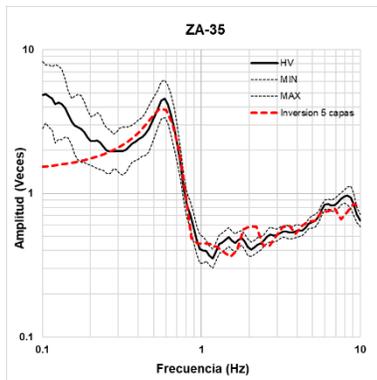
Modelo 5 capas ZA-10		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.0	207.74
2	1.24	589.05
3	31.66	99.05
4	229.74	568.15
5	-	665.54



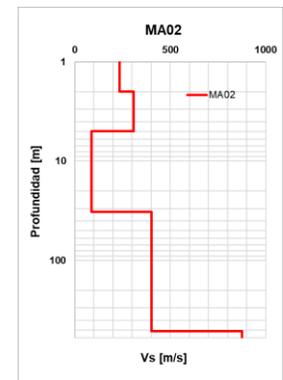
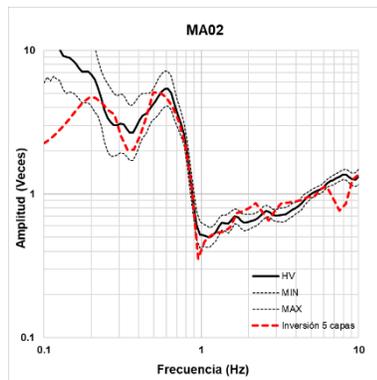
Modelo 5 capas ZA-23		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.0	287.74
2	1.02	589.05
3	25.89	112.05
4	444.5	400.15
5	-	778.54



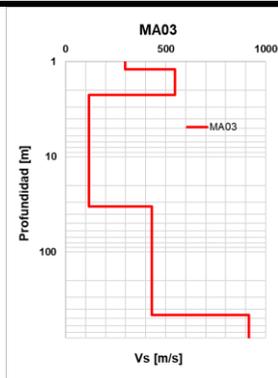
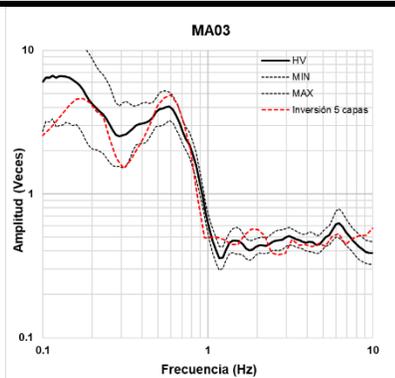
Modelo 5 capas ZA-24		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.02	287.74
2	1.07	589.05
3	23.40	108.05
4	318.44	456.15
5	-	745.54



Modelo 5 capas ZA-35		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.35	217.74
2	2.36	589.05
3	33.7	118.05
4	310.88	656.15
5	-	845.54

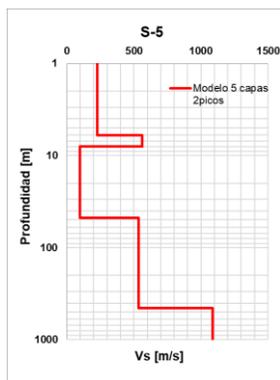
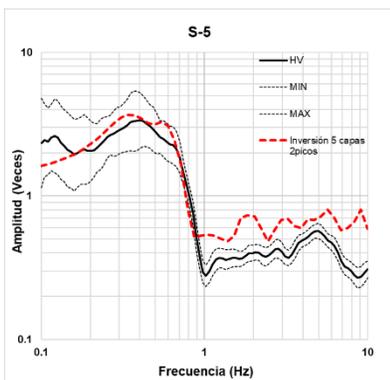


Modelo 5 capas MA-02		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.0	237.74
2	2.0	309.05
3	30.5	88.05
4	483.36	402.15
5	-	875.54

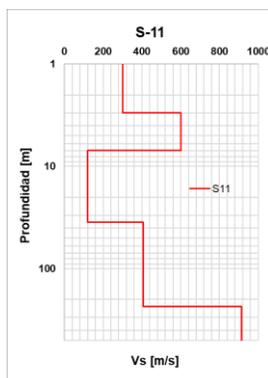
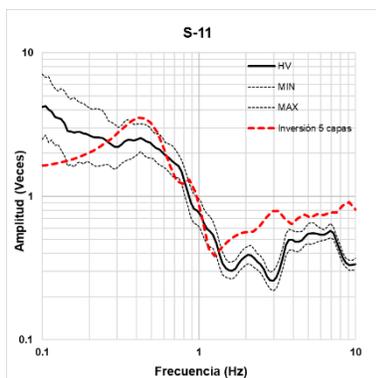


Modelo 5 capas MA-03		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.2	297.74
2	1.03	549.05
3	31.04	116.05
4	423.36	432.15
5	-	915.54

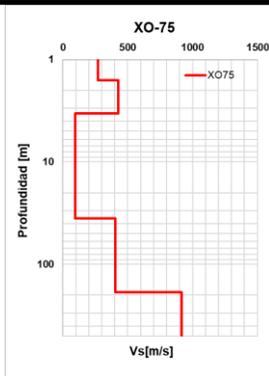
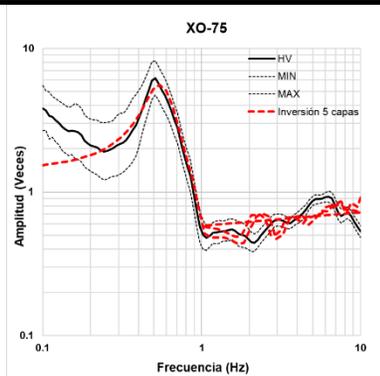
Cocientes espectrales HV y modelos de inversión de la familia 5



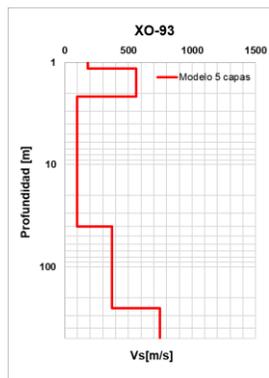
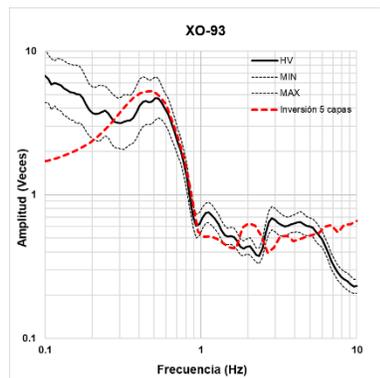
Modelo 5 capas S-05		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	6	225.55
2	2	563.54
3	38.82	99.81
4	406.28	536.82
5	-	1088



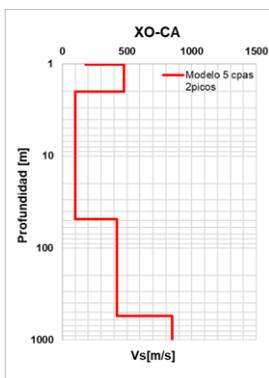
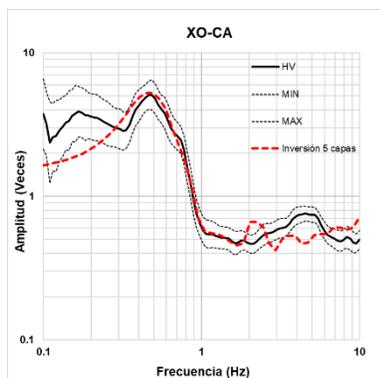
Modelo 5 capas S-11		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	3	300
2	4	600
3	29	119.42
4	200	407.86
5	-	913.91



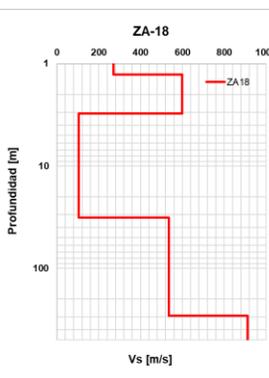
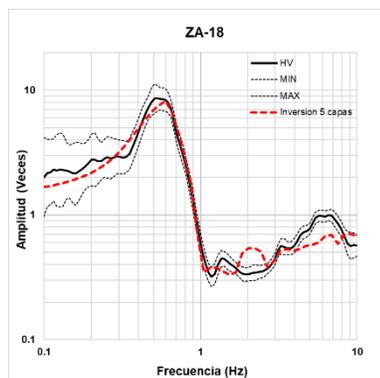
Modelo 5 capas XO-75		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.6	277.74
2	1.75	429.05
3	32.25	99.05
4	150.96	402.15
5	-	915.54



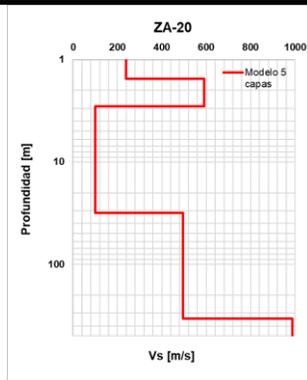
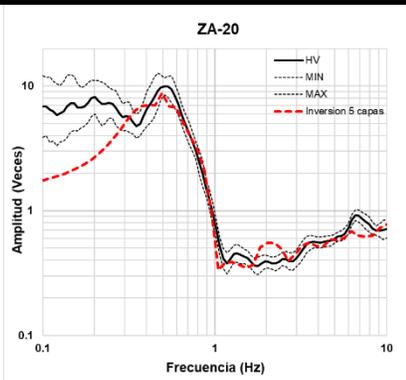
Modelo 5 capas XO-93		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.15	187.74
2	1.0	569.05
3	37.9	99.05
4	213.86	372.15
5	-	745.54



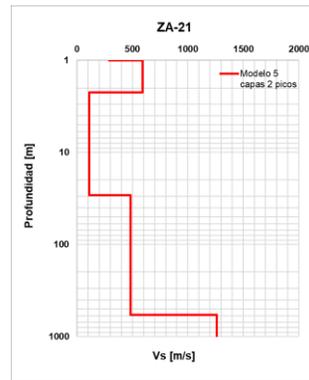
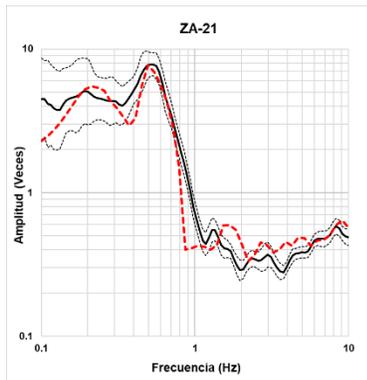
Modelo 5 capas XO-CA		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.01	187.74
2	1.0	469.05
3	42.7	99.05
4	502.81	422.15
5	-	845.54



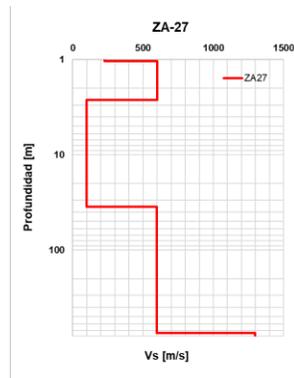
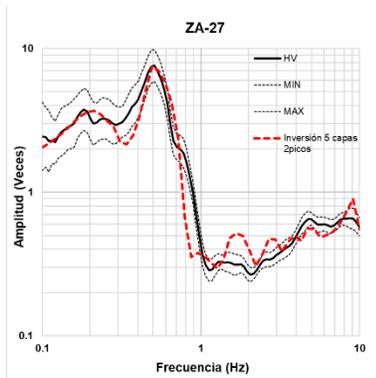
Modelo 5 capas ZA-18		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.0	287.74
2	1.81	599.05
3	31.03	105.05
4	263.38	535.15
5	-	915.54



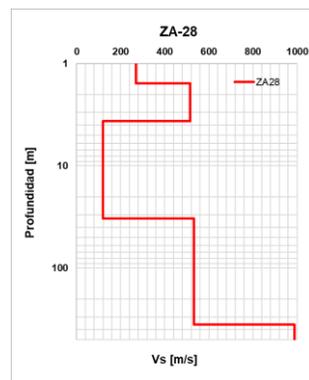
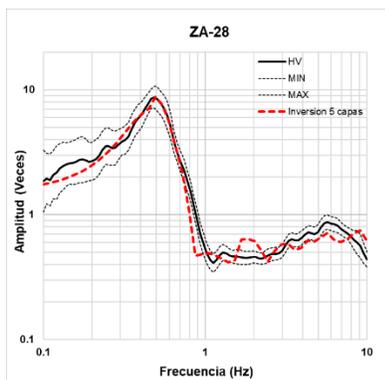
Modelo 5 capas ZA-20		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.54	237.74
2	1.33	590.05
3	29.59	99.05
4	307.6	495.15
5	-	985.54



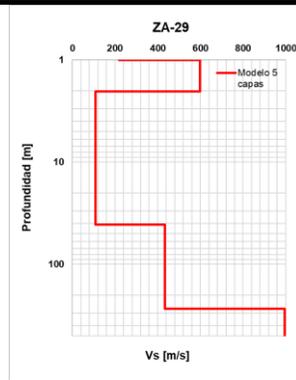
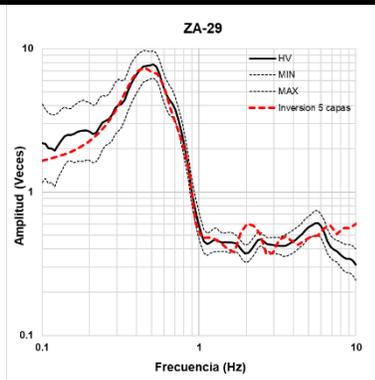
Modelo 5 capas ZA-21		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1	291.48
2	1.23	532.93
3	28	109.48
4	500.7	482.14
5	-	1262.56



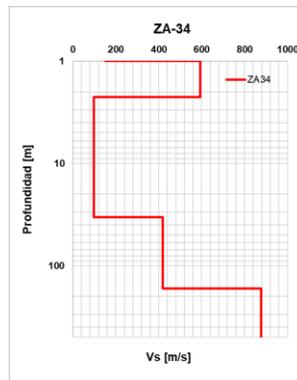
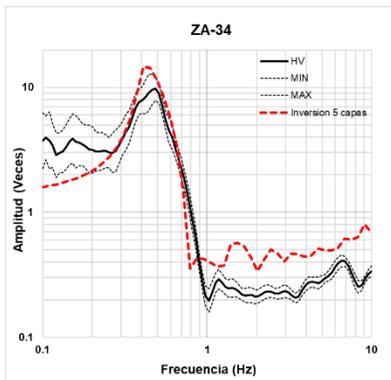
Modelo 5 capas ZA-27		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.04	227.74
2	1.6	599.05
3	32.56	99.05
4	705.81	595.15
5	-	1235.54



Modelo 5 capas ZA-28		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.55	267.74
2	2.08	519.05
3	30.12	119.05
4	322.03	535.15
5	-	985.54

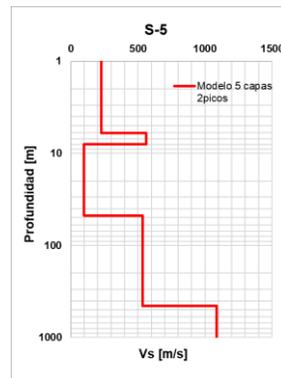
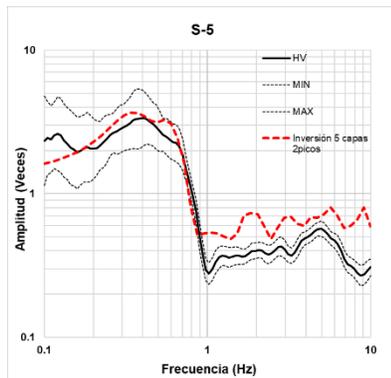


Modelo 5 capas ZA-29		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1	218.95
2	1.04	598.79
3	38.81	108.85
4	232.34	433.86
5	-	995.12

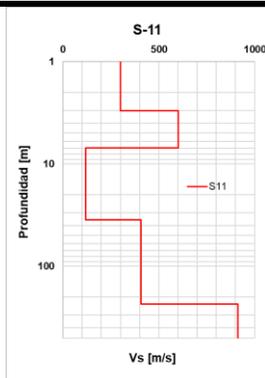
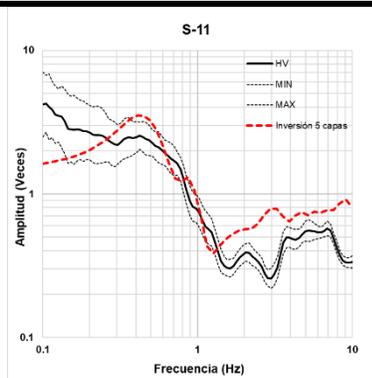


Modelo 5 capas ZA-34		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.0	167.74
2	1.24	594.05
3	31.28	97.05
4	133.91	415.15
5	-	875.54

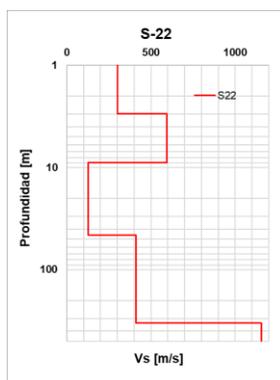
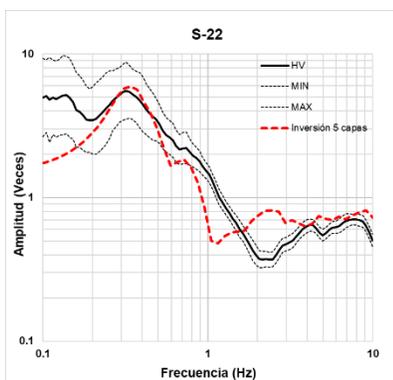
Cocientes espectrales HV y modelos de inversión de la familia 6



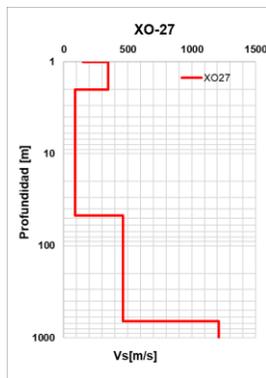
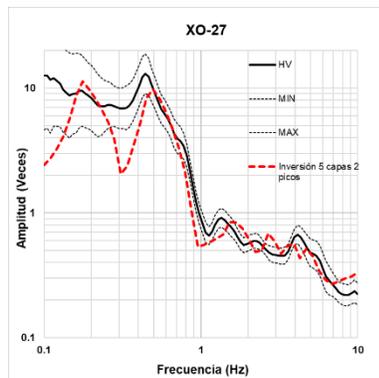
Modelo 5 capas S-05		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	6.0	225.55
2	2.0	563.54
3	39.82	95.81
4	406.28	536.82
5	-	1088.0



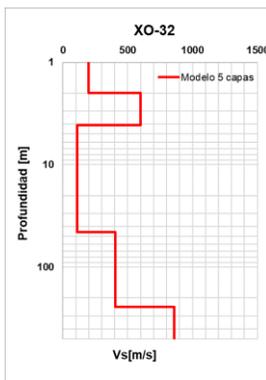
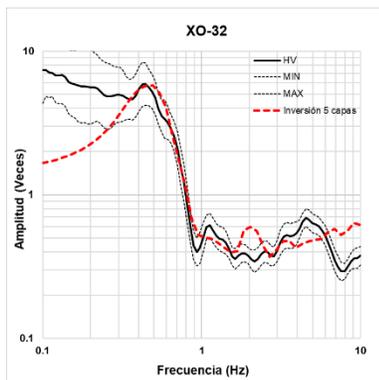
Modelo 5 capas S-11		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	3.0	300
2	4.0	600
3	28	119.42
4	199	407.86
5	-	913.91



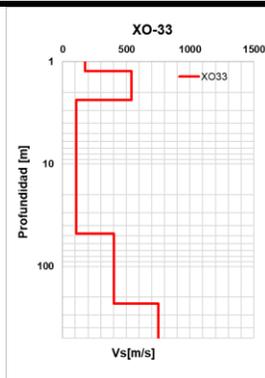
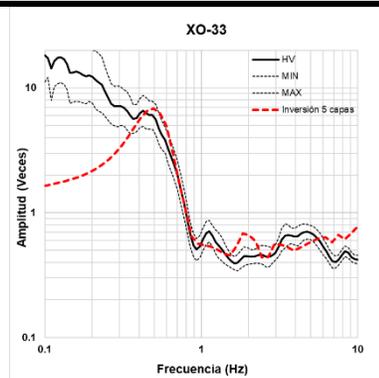
Modelo 5 capas S-22		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.0	157.74
2	1.1	344.05
3	43.76	90.05
4	614.72	465.15
5	-	1215.54



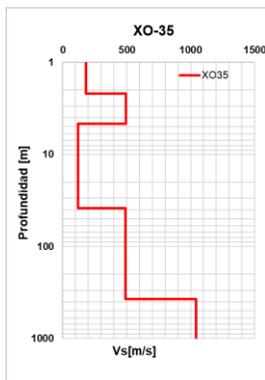
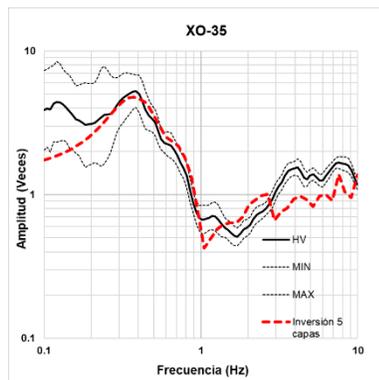
Modelo 5 capas XO-27		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	3.0	299.94
2	6.0	594.29
3	40.5	118.05
4	292.5	412.17
5	-	1156.9



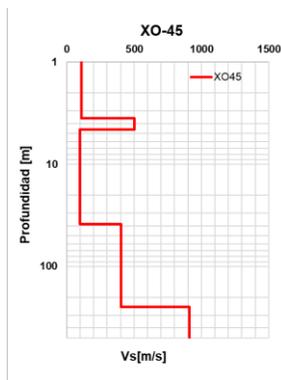
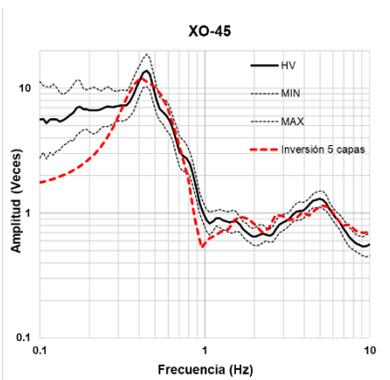
Modelo 5 capas XO-32		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	2.0	197.74
2	2.09	594.05
3	41.38	110.05
4	199.94	405.15
5	-	855.54



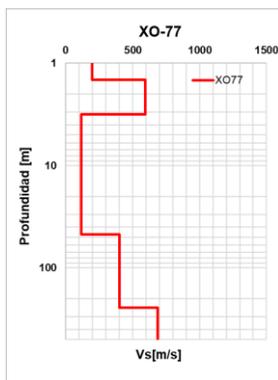
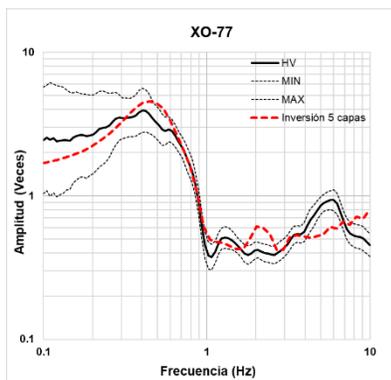
Modelo 5 capas XO-33		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.2	177.74
2	1.13	534.05
3	45.24	110.05
4	183.46	405.15
5	-	755.54



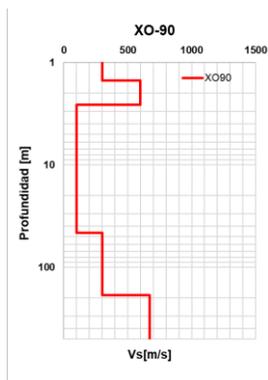
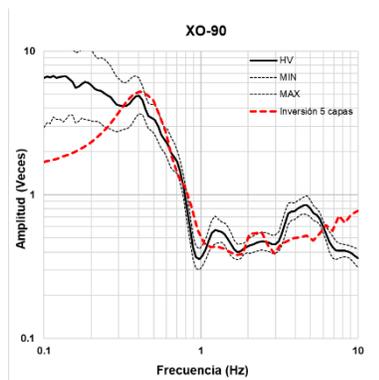
Modelo 5 capas XO-35		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	2.19	181.4
2	2.43	494.05
3	34.74	119.05
4	336.86	495.15
5	-	1045.54



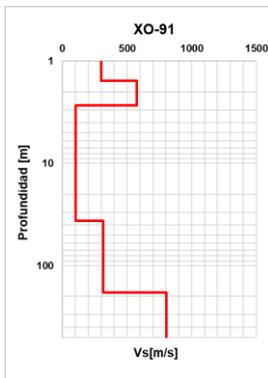
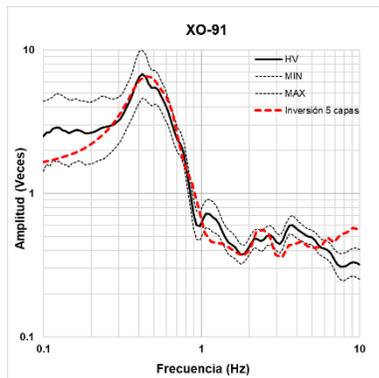
Modelo 5 capas XO-45		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.0	109.75
2	3.57	503.35
3	33.9	98.32
4	211.39	404.98
5	-	911.15



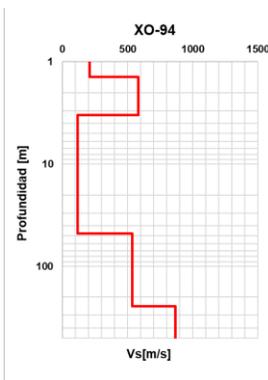
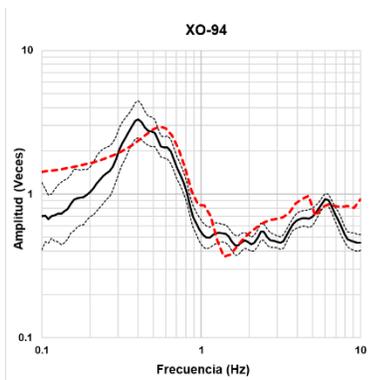
Modelo 5 capas XO-77		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.45	198.04
2	1.71	592.85
3	43.88	116.17
4	196.29	404.21
5	-	685.41



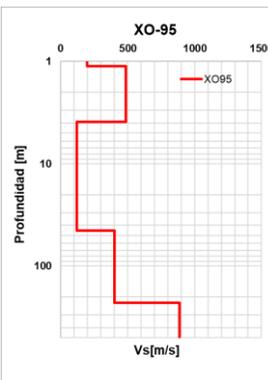
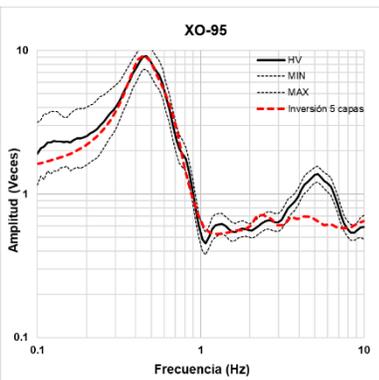
Modelo 5 capas XO-90		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.5	298.44
2	1.08	599.46
3	43.42	99.6
4	141.41	300.0
5	-	675.45



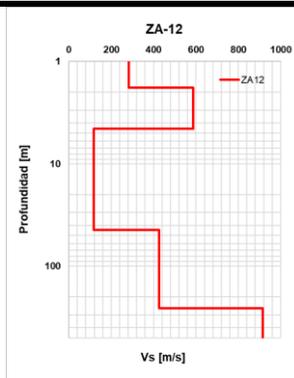
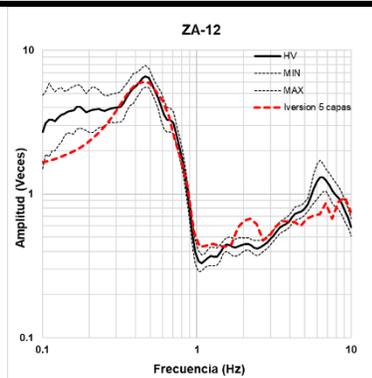
Modelo 5 capas XO-91		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.56	298.08
2	1.15	574.22
3	35.49	100.6
4	146.58	310.23
5	-	803.67



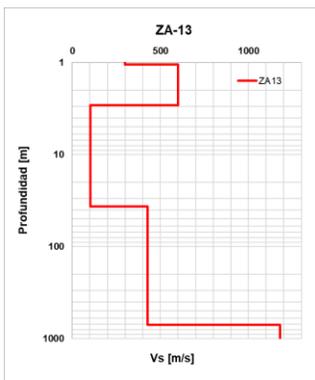
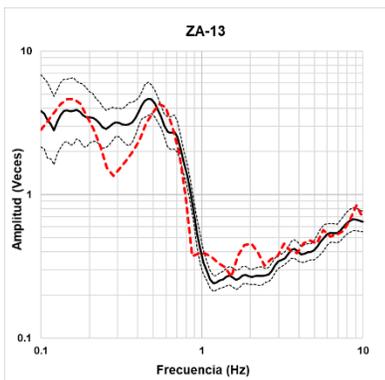
Modelo 5 capas XO-94		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.4	210.44
2	1.91	583.85
3	44.59	117.92
4	197.32	535.51
5	-	869.29



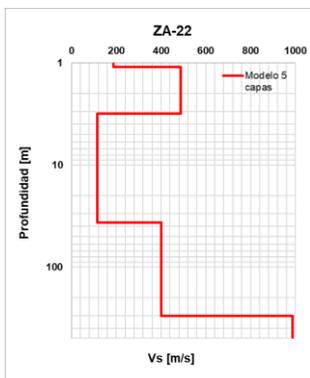
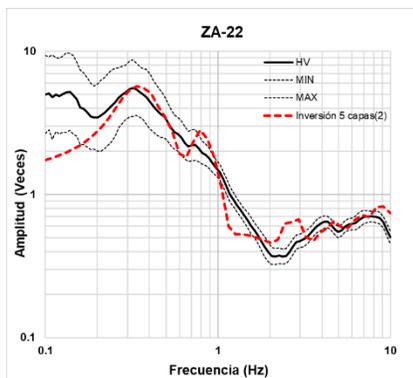
Modelo 5 capas XO-95		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.11	199.07
2	2.8	485.12
3	42.2	119.98
4	182.72	400.68
5	-	888.1



Modelo 5 capas ZA-12		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.8	282.09
2	2.74	589
3	39.69	116.61
4	212.89	426.48
5	-	916.06

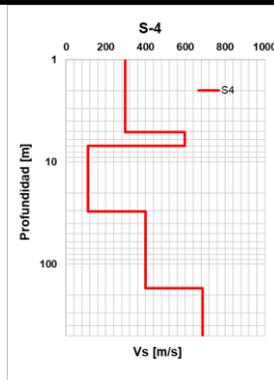
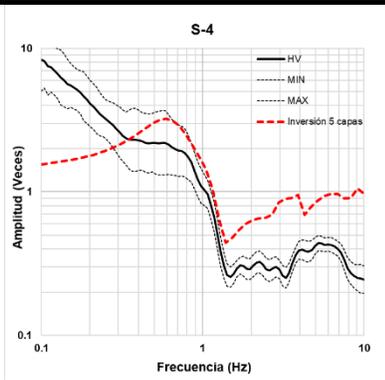


Modelo 5 capas ZA-13		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.05	299.84
2	1.87	599.67
3	36.72	102.53
4	676.56	428.19
5	-	1178.42

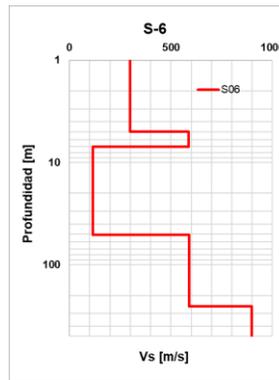
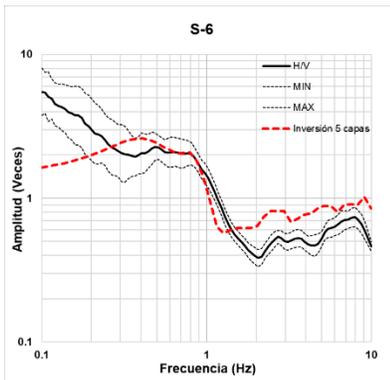


Modelo 5 capas ZA-22		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.1	187.24
2	2.06	487.16
3	33.62	115.12
4	265.78	400.43
5	-	988.36

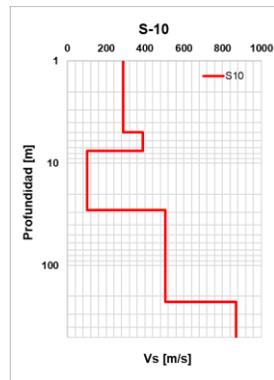
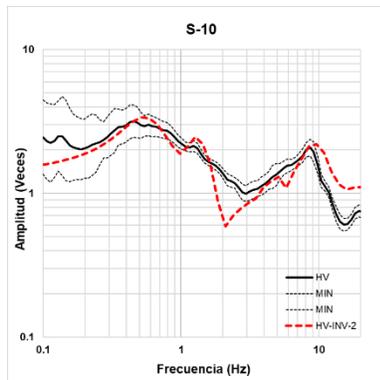
Cocientes espectrales HV y modelos de inversión de la familia anómala



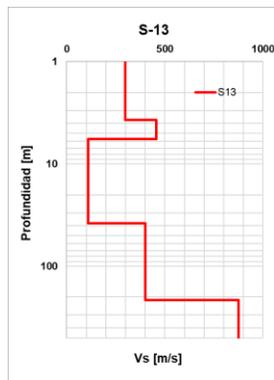
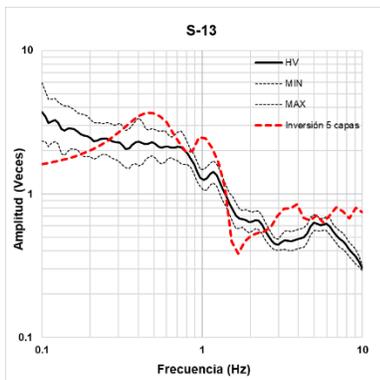
Modelo 5 capas S-04		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	5.07	297.02
2	1.87	598.59
3	23.39	109.8
4	141.89	400.54
5	-	686.12



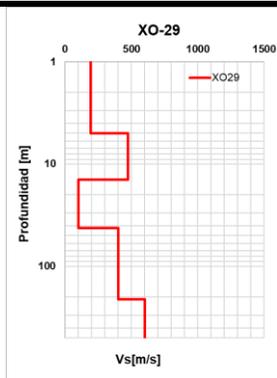
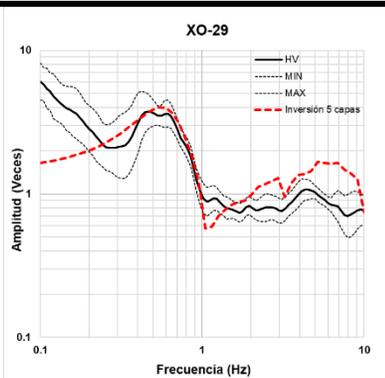
Modelo 5 capas S-06		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	5.0	297.76
2	2.0	598.1
3	44.25	114.34
4	202.75	589.34
5	-	899.25



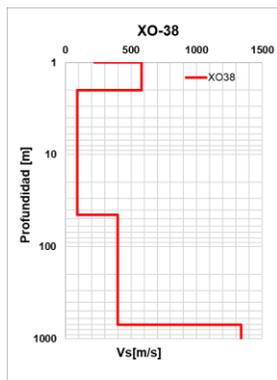
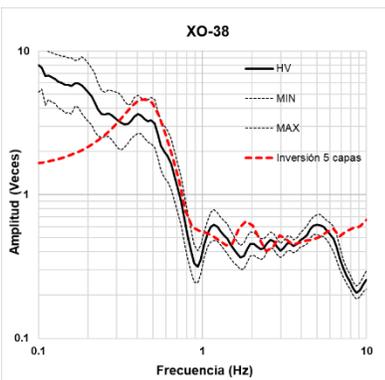
Modelo 5 capas S-10		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	5.0	288.79
2	2.55	389.23
3	21.19	102.75
4	198.32	505.85
5	-	871.28



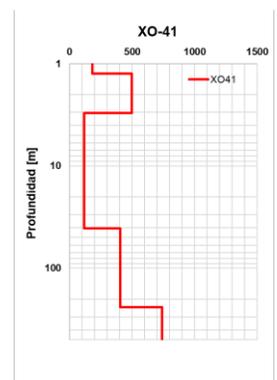
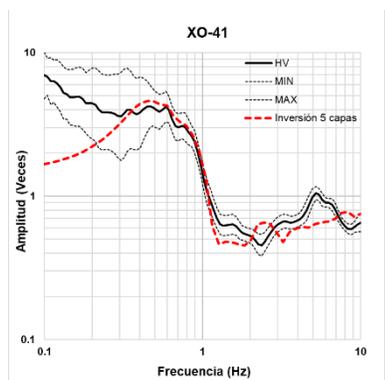
Modelo 5 capas S-13		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	3.69	298.2
2	2.0	456.5
3	32.44	110.9
4	175.17	213.3
5	-	876.3



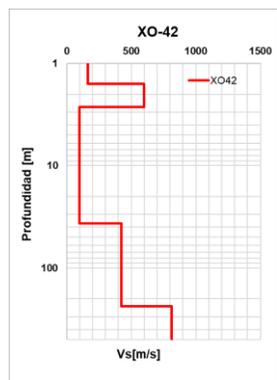
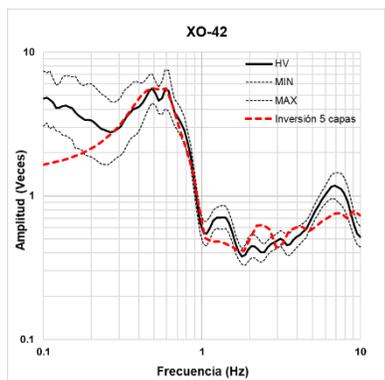
Modelo 5 capas XO-29		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	5	192.94
2	8.27	475.31
3	28.14	99.94
4	168.83	402.51
5	-	600.78



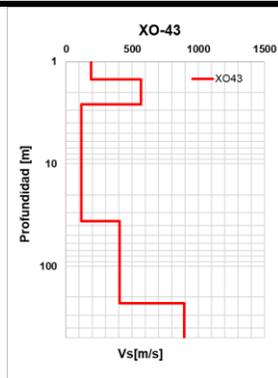
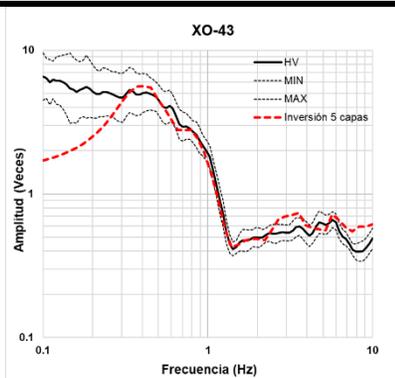
Modelo 5 capas XO-38		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.0	221.4
2	1.0	584.05
3	43.08	90.05
4	661.44	400.15
5	-	1335.54



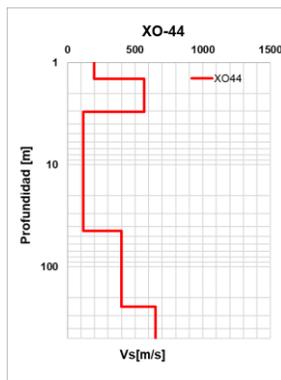
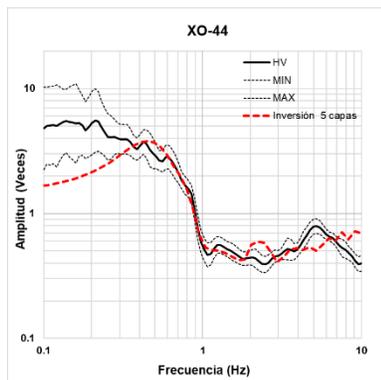
Modelo 5 capas XO-41		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.25	182.32
2	1.8	498.51
3	37.26	116.47
4	199.67	404.78
5	-	741.44



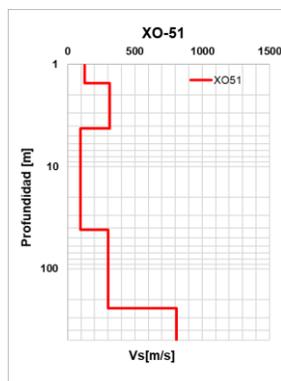
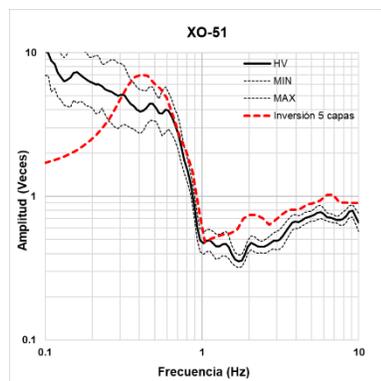
Modelo 5 capas XO-42		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.58	162.27
2	1.10	597.92
3	34.07	100.17
4	119.12	423.99
5	-	811.28



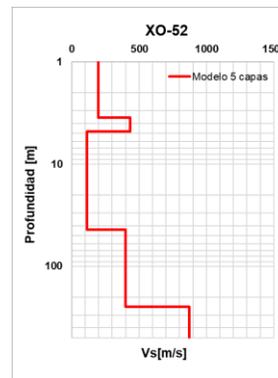
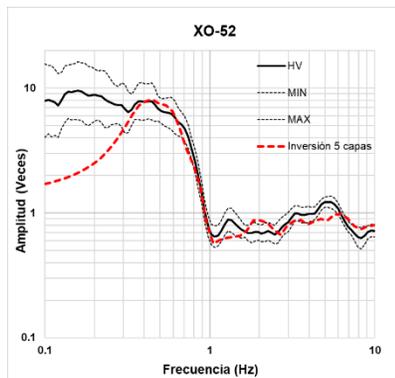
Modelo 5 capas XO-43		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.5	188.87
2	1.13	567.35
3	33.6	115.66
4	194.49	403.41
5	-	891.2



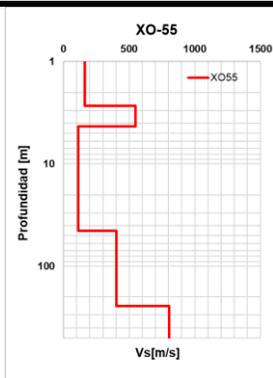
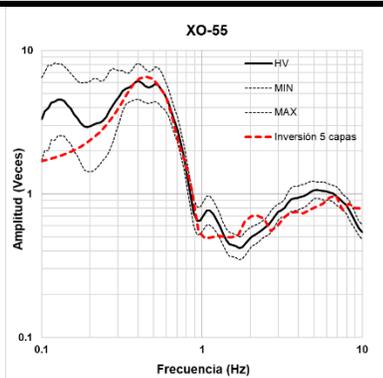
Modelo 5 capas XO-44		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.45	199.98
2	1.6	568.22
3	41.38	117.77
4	199.9	400.47
5	-	651.69



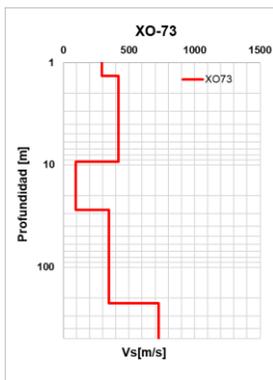
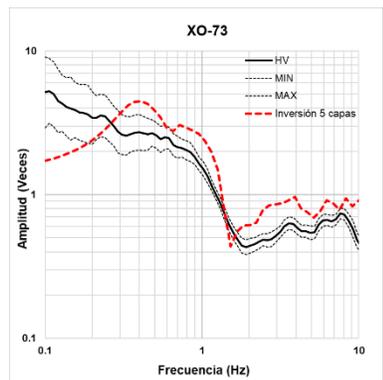
Modelo 5 capas XO-51		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.53	127.46
2	2.69	312.46
3	37.38	95.62
4	200	300.31
5	-	808.21



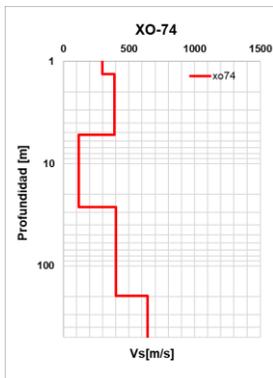
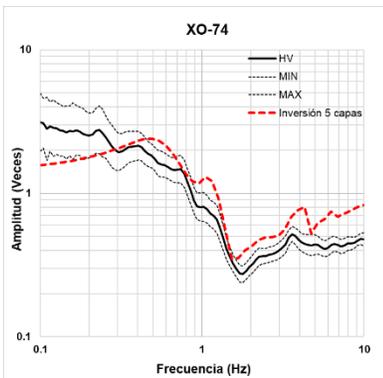
Modelo 5 capas XO-52		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	3.52	195.32
2	1.29	434.31
3	39.18	114.56
4	243.61	400.06
5	-	871.95



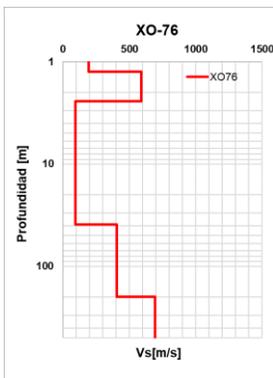
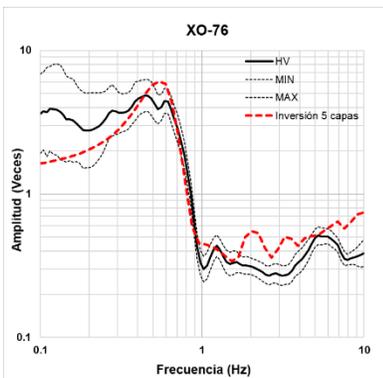
Modelo 5 capas XO-55		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	2.71	161.21
2	1.58	547.73
3	40.91	113.4
4	200.96	403.49
5	-	806.08



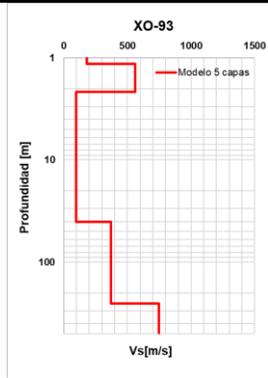
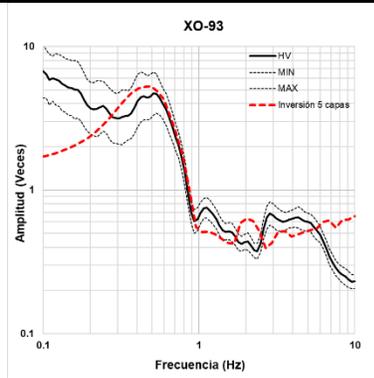
Modelo 5 capas XO-73		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.35	294.29
2	8.01	422.707
3	18.13	952.74
4	196.88	347.28
5	-	727.32



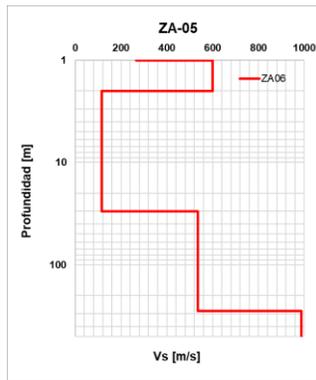
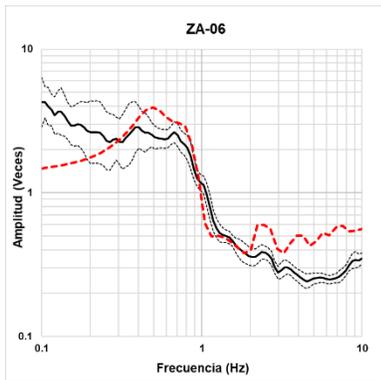
Modelo 5 capas XO-74		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.34	299.62
2	3.89	389.76
3	21.47	116.83
4	170.32	400.06
5	-	641.11



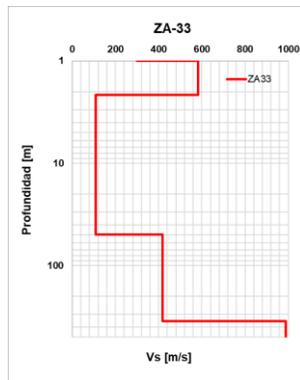
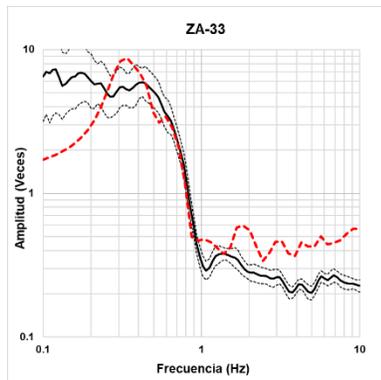
Modelo 5 capas XO-76		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.0	193.4
2	1.0	584.05
3	43.08	92.05
4	661.44	404.15
5	-	994.54



Modelo 5 capas XO-93		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.15	182.82
2	2.0	562.45
3	38.35	99.57
4	213.86	372.71
5	-	747.38



Modelo 5 capas ZA-06		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.01	266.76
2	2.0	599.86
3	28.11	114.55
4	254.21	534.85
5	-	987.54



Modelo 5 capas ZA-33		
Capa	Espesor [m]	Vs [m/s]
1	1.0	299.66
2	1.14	582.7
3	47.21	107.92
4	300.28	419.12
5	-	988.12

ANEXO B

Información de la ubicación de los puntos de medición de ruido sísmico ambiental, así como los valores de frecuencia, periodo y amplificación relativa determinados a partir de los cocientes espectrales H/V, así como los valores de espesor obtenidos con la inversión de los cocientes espectrales.

Punto	Latitud	Longitud	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Espesor Hvinv®[m]	Relación forma exponencial [m]
S-02	19.247308	-99.089035	3.00	0.33	13.23	8.26
S-04	19.247834	-99.089160	0.60	1.67	29.34	22.54
S-05	19.248301	-99.089185	0.40	2.50	50.12	45.19
S-06	19.247605	-99.089199	0.40	2.50	52.56	45.19
S-07	19.247490	-99.088470	3.00	0.33	7.54	8.26
S-08	19.247523	-99.087980	0.56	1.79	25.5	24.65
S-09	19.247160	-99.087691	3.13	0.32	9.1	8.18
S-10	19.247286	-99.087645	0.55	1.82	27.3	25.26
S-11	19.247242	-99.087196	0.50	2.00	29.00	28.96
S-12	19.246890	-99.087360	2.36	0.42	7.67	8.85
S-13	19.247791	-99.088348	0.45	2.22	34.78	34.23
S-14	19.246830	-99.089840	2.48	0.40	10.21	8.71
S-15	19.246889	-99.089891	0.60	1.67	30.45	22.54
S-16	19.246989	-99.089967	0.46	2.17	35.78	33.01
S-17	19.247233	-99.089256	1.75	0.57	10.23	9.88
S-20	19.247372	-99.088434	3.20	0.31	7.4	8.13
S-21	19.247000	-99.087230	0.75	1.33	19.32	17.54
S-22	19.247487	-99.089201	0.35	2.86	46.12	52.59
S-25	19.246890	-99.089850	0.60	1.67	20.13	22.54
XO-22	19.246630	-99.089420	2.26	0.44	6.00	8.97
XO-27	19.250152	-99.088989	0.41	2.44	46.00	40.30
XO-29	19.248060	-99.089020	0.46	2.17	42.00	33.01
XO-32	19.247920	-99.087140	0.44	2.27	45.00	35.56
XO-33	19.247751	-99.086859	0.42	2.38	47.00	38.58
XO-35	19.247956	-99.088693	0.40	2.50	37.00	42.19
XO-38	19.248180	-99.088250	0.42	2.38	45.00	38.58
XO-41	19.247650	-99.089650	0.42	2.38	40.00	38.58
XO-42	19.247801	-99.089779	0.52	1.92	37.00	27.33
XO-43	19.247705	-99.089351	0.40	2.50	36.00	42.19
XO-44	19.248090	-99.089460	0.44	2.27	43.00	35.56
XO-45	19.249210	-99.089170	0.43	2.33	38.00	37.00
XO-49	19.247670	-99.089970	0.59	1.69	31.00	23.02

XO-51	19.247777	-99.090147	0.46	2.17	41.00	33.01
XO-52	19.248331	-99.089344	0.42	2.38	44.00	38.58
XO-55	19.248361	-99.088352	0.40	2.50	45.00	42.19
XO-60	19.247195	-99.089022	2.48	0.40	4.00	8.71
XO-65	19.244305	-99.088548	3.27	0.31	10.00	8.09
XO-66	19.2451	-99.088767	5.21	0.19	3.00	7.43
XO-68	19.246031	-99.088406	1.87	0.53	9.00	9.62
XO-69	19.244288	-99.087054	5.99	0.17	10.00	7.29
XO-72	19.246005	-99.087788	4.75	0.21	7.00	7.53
XO-73	19.247477	-99.089254	0.42	2.38	27.00	38.58
XO-74	19.247234	-99.087294	0.50	2.00	26.00	28.96
XO-75	19.247766	-99.090367	0.51	1.96	35.00	28.12
XO-76	19.248044	-99.089884	0.44	2.27	38.00	35.56
XO-77	19.248101	-99.08951	0.40	2.50	46.00	42.19
XO-79	19.247015	-99.090805	0.60	1.67	34.00	22.54
XO-80	19.246392	-99.090681	0.45	2.22	38.00	34.23
XO-81	19.248025	-99.088224	0.40	2.50	34.00	42.19
XO-90	19.24814	-99.08784	0.40	2.50	45.00	42.19
XO-91	19.24856	-99.08764	0.42	2.38	35.00	38.58
XO-93	19.24861	-99.08805	0.43	2.33	40.00	37.00
XO-94	19.24782	-99.08811	0.40	2.50	47.00	42.19
XO-95	19.24903	-99.09004	0.40	2.50	46.00	42.19
XO-96	19.24665	-99.08695	2.36	0.42	3.00	8.85
XO-99	19.24686	-99.08734	1.79	0.56	9.00	9.79
XO-CA	19.248643	-99.089578	0.45	2.22	44.00	34.23
ZA-01	19.246842	-99.093516	2.15	0.47	12	9.12
ZA-03	19.246942	-99.092945	0.60	1.67	32.00	22.54
ZA-05	19.246915	-99.092403	0.55	1.82	33.00	25.26
ZA-06	19.249165	-99.093822	0.50	2.00	30.00	28.96
ZA-08	19.248397	-99.093441	2.26	0.44	11.00	8.97
ZA-10	19.248126	-99.092375	0.50	2.00	41.00	28.96
ZA-12	19.250530	-99.091758	0.43	2.33	44.00	37.00
ZA-13	19.250476	-99.091501	0.45	2.22	36.00	34.23
ZA-16	19.250187	-99.091520	0.50	2.00	30.00	28.96
ZA-18	19.249563	-99.091663	0.51	1.96	32.00	28.12
ZA-20	19.249111	-99.091824	0.51	1.96	31	28.12
ZA-21	19.248696	-99.091919	0.50	2.00	28.00	28.96
ZA-22	19.248443	-99.092014	0.40	2.50	37.00	42.19
ZA-23	19.244602	-99.092145	0.65	1.54	27.00	20.46
ZA-24	19.245216	-99.092754	0.61	1.64	25.00	22.08

ZA-26	19.247738	-99.091633	0.45	2.22	35.00	34.23
ZA-27	19.248588	-99.090596	0.50	2.00	35.00	28.96
ZA-28	19.249591	-99.090540	0.49	2.04	32.00	29.87
ZA-29	19.251408	-99.08976	0.45	2.22	40.00	34.23
ZA-30	19.244313	-99.091051	1.71	0.58	6.00	9.98
ZA-33	19.251424	-99.093643	0.40	2.50	50.00	42.19
ZA-34	19.250475	-99.094175	0.40	2.50	53.00	42.19
ZA-35	19.249155	-99.094669	0.55	1.82	38.00	25.26
ZA-36	19.248197	-99.095144	1.35	0.74	20.00	11.23
ZA-37	19.246579	-99.094725	5.21	0.19	13.00	7.43
ZA-38	19.245893	-99.093744	1.23	0.81	20.00	11.86
ZA-40	19.243779	-99.091935	2.36	0.42	10.00	8.85
LM-C	19.248576	-99.092882	1.20	0.83	19	12.04
MA02	19.249273	-99.094412	0.60	1.67	32	22.54
MA03	19.249473	-99.092348	0.59	1.69	33	23.02